le Scienze

Aprile 2019
euro 4,90

edizione italiana di Scientific American

Clima: ultima chiamata

Ridurre le emissioni non basta più. Per limitare l'aumento della temperatura dovremo anche eliminare dall'atmosfera la CO_2 accumulata finora

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003
CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA
RIVISTA MENSILE - NUMERO 608 - 3 APRILE 2019

Astronomia
Che cosa può insegnarci Venere sui pianeti extrasolari

Biologia
Resuscitare i geni di una pianta estinta

Neuroscienze
La regione del cervello in cui nascono i sogni

OTTOCENTO

L'ARTE DELL'ITALIA TRA HAYEZ E SEGANTINI

FORLÌ
MUSEI SAN DOMENICO
9 FEBBRAIO
16 GIUGNO 2019

Informazioni e prenotazioni mostra
199 15 11 34

riservato gruppi e scuole
0543 36 217
mostraforli@civita.it

Biglietti
intero € 12,00
ridotto € 10,00

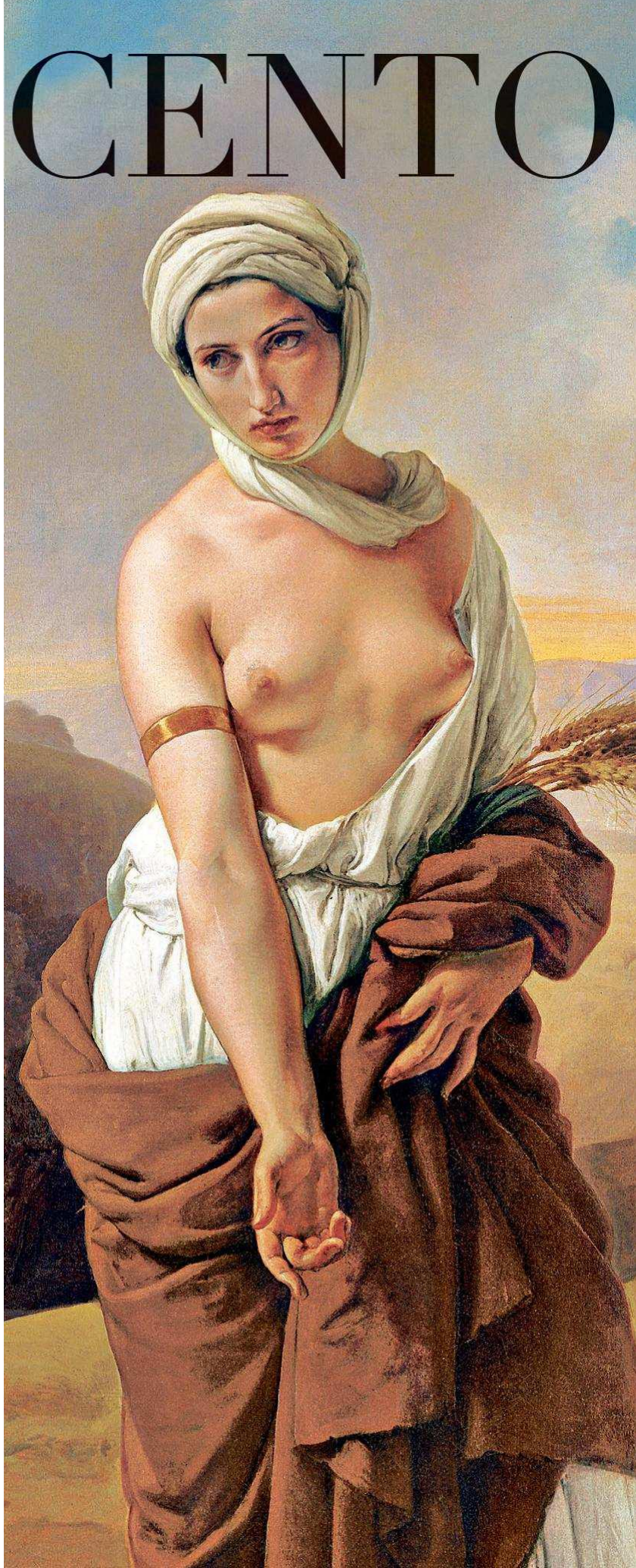
Orario di visita
da martedì a venerdì: 9.30-19.00
sabato, domenica, giorni festivi: 9.30-20.00
lunedì chiuso
22 e 29 aprile apertura straordinaria

La biglietteria chiude un'ora prima

Catalogo **SilvanaEditoriale**

www.mostraottocento.com

Fondazione
Cassa dei Risparmi
di Forlì

in collaborazione
con
Comune di Forlì

Sommario

Per mantenere l'aumento della temperatura del pianeta entro 1,5 °C bisognerà ridurre le emissioni ed eliminare dall'atmosfera ingenti quantità di CO_2 (Foto: *Oliver Berg/picture alliance via Getty Images*)

aprile 2019 numero 608

Fotografia di Liz Tormes

12

19

91

SCIENZA NEWS

Cortesia École polytechnique - J. Barande (*Gérard Mourou*); cortesia NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASU (*Marte*); Di HelloRF Zcool/Shutterstock (*aglio*)

ANCHE QUESTO
È INAIL.
PARTNERSHIP
TECNOLOGIA
PROGETTAZIONE
INAIL

di Marco Cattaneo

Editoriale

Un mondo vivibile per le nuove generazioni

Solo decisioni lungimiranti su temi complessi potranno contenere il riscaldamento del pianeta

Il 20 agosto 2018 Greta Thunberg non è andata a scuola. Si è seduta davanti al Riksdag, il Parlamento svedese, con un cartello che recitava: *Skolstrejk för Klimatet*, sciopero della scuola per il clima. In seguito all'ondata di calore che aveva colpito la Svezia e agli incendi che ne erano seguiti, non sarebbe tornata a scuola fino al 9 settembre, data delle elezioni politiche nel paese. L'obiettivo della quindicenne era sensibilizzare il governo per avviare un serio processo di riduzione delle emissioni di CO_2 in ottemperanza all'Accordo di Parigi.

Sette mesi più tardi, Greta ha partecipato a un TEDxStockholm, ha parlato alla Conferenza sul clima COP24 delle Nazioni Unite e al World Economic Forum, è diventata il simbolo e l'ispiratrice dello School strike for climate che il 15 marzo ha visto sfilare milioni di giovani nelle città di mezzo mondo. E, se non bastasse, è stata candidata al Nobel per la pace.

Naturalmente c'è chi la ritiene manipolata dagli adulti, chi trova il suo messaggio semplicistico, chi addirittura la reputa inquietante. Ma, piaccia o no, Greta Thunberg è riuscita a portare la battaglia per contrastare il cambiamento climatico dagli appelli disperati dei climatologi e dalle distratte concessioni (spesso puramente di facciata) dei politici all'attenzione delle persone, e soprattutto dei giovani. E non è un merito da poco.

Già, perché nel suo rapporto speciale dell'ottobre scorso l'Intergovernmental Panel for Climate Change ha lanciato un allarme senza mezzi termini: se vogliamo evitare conseguenze catastrofiche per noi e per il pianeta, dobbiamo agire ora. Continuando al ritmo delle emissioni attuali, già entro il 2030 l'aumento della temperatura media globale sarà superiore agli 1,5 gradi considerati la soglia massima di sicurezza per avere effetti gestibili.

Superati questi limiti non basterà più limitare le emissioni, dovremo estrarre CO_2 dall'atmosfera per ridurre la concentrazione di gas serra, come spiega Richard Conniff a pagina 46. E per il momento non siamo ancora attrezzati. Ci sono impianti pilota, e diverse soluzioni da sperimentare. Ma i costi sono ancora elevati, soprattutto se sarà necessario rimuovere dall'atmosfera 1000 miliardi di tonnellate di CO_2 entro il 2100, come avvertono i nostri autori.

Contrastare il riscaldamento globale per lasciare un mondo vivibile a Greta Thunberg e a tutti i nati dopo il 2000 – ai nostri figli, in altre parole – significherà prendere decisioni politiche lungimiranti su un tema complesso con un alto contenuto scientifico e tecnologico. È così, d'altra parte, per tanti temi dell'agenda politica: dalle scelte energetiche all'impatto dell'intelligenza artificiale, alle nuove frontiere dell'ingegneria genetica. E dato che le scelte politiche influiranno sulla vita di tutti, sarebbe quanto mai opportuno che fossero fondate su informazioni scientifiche affidabili e coerenti, e che la politica si dotasse di strumenti di consulenza per poterle assumere con responsabilità e competenza.

Per questo, insieme a un nutrito gruppo di giornalisti scientifici e di scienziati italiani di statura internazionale, abbiamo deciso di promuovere l'appello che trovate a pagina 10. L'invito è semplice: è urgente che il Parlamento italiano si doti di un ufficio di consulenza autorevole e indipendente per la scienza e la tecnologia, come accade in quasi tutte le altre democrazie. Per aderire, lo trovate su www.lescienze.it.

In edicola

A richiesta con «Le Scienze» di maggio, *L'invisibile,* un libro di Philip Ball sull'attrazione del lato impercettibile della realtà

Un viaggio nel regno dell'invisibilità

Siamo circondati dall'invisibilità, al punto che la diamo per scontata. Campi elettromagnetici che permettono ai dispositivi digitali di collegarsi a Internet. Cellule del nostro corpo che lottano contro microrganismi portatori di malattie o che stabiliscono un rapporto di proficua collaborazione da cui il nostro corpo ne trae benefici. La forza di gravità che aiuta a strutturare l'universo come lo osserviamo oggi e che fornisce indizi sul suo passato assai remoto e sul suo futuro assai lontano. E se tutto questo non bastasse, siamo attratti dall'invisibilità.

Fin da bambini giochiamo a essere invisibili, spesso abbiamo amici invisibili: sono passaggi fondamentali per lo sviluppo psichico. Poi da adulti elaboriamo questa attrazione magari nello sviluppo di racconti e di miti: come per esempio Platone nella sua opera *La repubblica*, in cui per mezzo della voce del narratore (Glaucone), spiega che l'invisibilità è un problema morale, non tecnico. Gli invisibili saprebbero fare buon uso di questa loro facoltà? (La risposta è negativa.)

Un'altra elaborazione adulta è andare a sondare la realtà che non riusciamo a vedere ma che è proprio innanzi ai nostri occhi. Con lo sviluppo del metodo scientifico, questa curiosità ha portato, tra l'altro, alla scoperta delle già citate forze di gravità ed elettromagnetica. Isaac Newton e James Clerk Maxwell, nello svelare due delle quattro forze fondamentali della natura non hanno fatto altro che indagare nel mondo dell'invisibile agli occhi. Oggi i loro epigoni tentano di risolvere i rebus di materia ed energia oscure: la prima è una forma di materia che permea il cosmo ma è invisibile alla radiazione elettromagnetica; la seconda, agirebbe da acceleratore occulto nell'espansione dell'universo. Cercano di sviluppare tecnologie per l'invisibilità, mantelli che sembrano ispirati dai libri di Harry Potter oppure da romanzi di fantascienza come *L'uomo invisibile* di H. G. Wells. O, ancora, rimpiccioliscono componenti elettronici e meccanici di macchine sempre più piccole, al punto che fanno cose meravigliose senza che per noi abbiano modo di agire. Come se al loro interno ci fossero dèi o demoni, simili a quelli che abitavano il lato invisibile della realtà nel passato della nostra storia. È con l'Illuminismo, nel XVIII secolo, che la percezione magica del mondo inizia a collassare.

Il libro a richiesta con «Le Scienze» di maggio affronta tutto questo. In *L'invisibile*, il giornalista scientifico Philip Ball esamina il fascino che proviamo per quel che non si vede muovendosi lungo un percorso storico in cui si intrecciano scienza, tecnologia e cultura fino ai nostri giorni. Alla fine, scrive l'autore, è chiaro che i miti ci permettono di esplorare speranze e paure evocate da ciò che è invisibile ma che potrebbe essere raggiunto, e ci spingono a renderlo davvero raggiungibile.

DALLA RICERCA "MADE IN INAIL" UN CONTRIBUTO FONDAMENTALE PER LA PREVENZIONE E LA RIABILITAZIONE

Come ricorda una nuova campagna di comunicazione lanciata in queste settimane, l'Istituto è impegnato nello sviluppo di dispositivi e tecnologie all'avanguardia per aumentare i livelli di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro e migliorare la qualità della vita dei propri assistiti

Il suo nome è l'acronimo di Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro. Questa denominazione, però, non dà conto dell'insieme delle attività svolte dal "nuovo Inail", frutto di un complesso processo di ampliamento e riorganizzazione che nell'ultimo decennio – dopo l'incorporazione dell'Ispesl (Istituto superiore per la prevenzione e la sicurezza sul lavoro) e dell'Ipsema (Istituto di previdenza per il settore marittimo) – ha visto la progressiva integrazione di diverse funzioni aggiuntive rispetto a quelle tradizionali. L'Inail di oggi, infatti, non è più solo un'assicurazione ma un vero e proprio polo della salute e sicurezza sul lavoro, caratterizzato da un'integrazione sempre più stretta tra prevenzione, assicurazione, cura, riabilitazione, reinserimento e ricerca.

Una nuova campagna di comunicazione lanciata dall'Istituto in queste settimane è dedicata proprio all'attività di ricerca, che riveste un ruolo fondamentale in un'epoca di grande innovazione tecnologica come quella attuale, caratterizzata da interessanti prospettive di crescita ma anche da rischi potenziali, nuovi ed emergenti, per la salute e la sicurezza, come quelli legati alle nuove forme di organizzazione del lavoro, ai mutamenti demografici e alle nanotecnologie.

La ricerca avviata fin dagli anni Sessanta presso il Centro Protesi Inail di Vigorso di Budrio, modello di eccellenza e punto di riferimento nazionale e internazionale nel trattamento protesico-riabilitativo, è stata perciò arricchita attraverso collaborazioni con realtà di primo piano del mondo accademico e produttivo, finalizzate allo sviluppo di nuovi strumenti, procedure e tecnologie in grado di innalzare i livelli di prevenzione e potenziare i percorsi riabilitativi e di reinserimento degli assistiti.

Le partnership dell'Inail con l'Istituto Italiano di Tecnologia di Genova, la Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa e l'Università Campus Bio-Medico di Roma, per esempio, hanno permesso di avviare la sperimentazione di soluzioni all'avanguardia per la riabilitazione, come la mano robotica "Hannes", che permette ai pazienti amputati di recuperare il 90% delle funzionalità di un arto naturale, l'esoscheletro "Twin", che aiuta a muoversi in autonomia chi non può camminare, il verticalizzatore "Rise", un dispositivo in grado di restituire la postura eretta a persone con gravi disabilità motorie a carico degli arti inferiori, e il progetto "Sensibilia", nato con l'obiettivo di restituire a chi ha perso una mano sensazioni tattili e propriocettive simili a quelle di un arto naturale, attraverso il ricorso a mani bioniche controllate dal cervello tramite elettrodi neurali.

Sul versante della prevenzione, traguardi altrettanto importanti già raggiunti dalla ricerca "made in Inail" sono quelli rappresentati dai robot che sostituiscono i lavoratori costretti a operare in ambienti confinati ad alto rischio – come serbatoi, cisterne e silo – e dai dispositivi indossabili che potenziano le capacità fisiche, riducendo o eliminando del tutto gli sforzi muscolari. Grazie alla collaborazione con Sapienza Università di Roma, un anno fa ha preso anche il via un innovativo master biennale per formare i "risk manager" del futuro, figure specializzate che saranno in grado di affrontare le sfide dell'innovazione tecnologica, attraverso l'acquisizione di conoscenze per la gestione integrata dei rischi in tutta la filiera dei processi produttivi.

Sapienza Università di Roma, Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa e Politecnico di Milano, inoltre, sono partner dell'Istituto in tre dei "competence center" costituiti negli ultimi mesi in attuazione del piano nazionale Industria 4.0, con il compito di fornire alle aziende un sostegno per il trasferimento tecnologico e l'innovazione negli ambiti della sicurezza informatica, della robotica e del settore manifatturiero.

Al servizio della democrazia

Un rapporto sui serbatoi di batteri che resistono agli antibiotici. Poi un altro sui cambiamenti climatici e su come limitare l'aumento medio della temperatura del pianeta entro 1,5 gradi. Infine, un'offerta agli studenti per comunicare la ricerca scientifica «nel mondo reale». Sono questi, al momento in cui scriviamo, i tre nuovi temi del Parliamentary Office of Science and Technology (POST), l'Ufficio per la scienza e la tecnologia del Parlamento del Regno Unito, che si autodefinisce fonte interna di «analisi indipendenti, bilanciate e accessibili di problemi di politica pubblica che hanno a che fare con la scienza e la tecnologia». Moltissimi altri parlamenti in tutto il mondo si sono dotati di un ufficio simile a quello dell'assemblea legislativa più antica del mondo. Il Parlamento europeo può contare, per esempio, sul Comitato di valutazione delle opzioni scientifiche e tecnologiche (STOA).

Perché gran parte delle assise legislative dei paesi democratici ha scelto di dotarsi di simili comitati di esperti in scienza e tecnologia? Beh, i motivi sono essenzialmente due.

Il primo è che una quantità crescente del tempo e delle attività dei parlamentari ha a che fare con temi correlati alla scienza e alla tecnologia. Non è una sorpresa. È, semplicemente, il segno dei tempi. Viviamo nella società e nell'economia della conoscenza. Viviamo nell'era della domanda crescente di nuovi diritti di cittadinanza: i diritti di cittadinanza scientifica. Di conseguenza, le massime agorà della democrazia – i parlamenti, appunto – non possono non occuparsi di conoscenza: sia della produzione di nuova conoscenza (la scienza) sia delle applicazioni delle nuove conoscenze (l'innovazione tecnologica fondata sulla scienza).

Il secondo motivo è che i parlamenti, per essere in grado di prendere decisioni ponderate su «problemi di politica pubblica che hanno a che fare con la scienza e la tecnologia», devono poter contare su «analisi indipendenti, bilanciate e accessibili» realizzate da consulenti scientifici.

I comitati di esperti non sostituiscono il Parlamento. Le scelte restano responsabilità e prerogativa degli eletti dal popolo. Ma i comitati di esperti assolvono al ruolo di facilitare scelte documentate e ben fondate. Sono, in definitiva, una necessità e insieme un'espressione di una democrazia matura. Sono la forma tangibile di una scienza al servizio della democrazia.

Ebbene, nel novero crescente dei parlamenti che si sono dotati di comitati di scienziati esperti per poter contare su analisi indipendenti, bilanciate e accessibili sulla base delle quali operare le proprie scelte in materie che hanno a che fare con la scienza e la tecnologia manca l'Italia.

In qualche modo ce ne accorgiamo. Nel nostro Parlamento molto – troppo – spesso i dibattiti e le decisioni tipiche della società e dell'economia della conoscenza sono poco informati, poco ponderati. Ideologici. Il paese stesso ne risente. Infatti l'Italia stenta a entrare nella società e nell'economia della conoscenza. Certo: non tutte le responsabilità ricadono sul Parlamento. Tuttavia, è anche vero che, in quota parte, il Parlamento ha le sue responsabilità.

Di qui nasce l'appello (*si veda la pagina a fronte*) che un piccolo gruppo di ricercatori e di giornalisti scientifici rivolge al parlamento italiano affinché si doti di un Comitato per la scienza e la tecnologia capace di analisi indipendenti, bilanciate e accessibili a tutti i cittadini. L'appello, a cui è stato dato il titolo *La scienza al servizio della democrazia*, è stato già sottoscritto da un numero elevato e qualificato di donne e uomini di scienza. Da fisici, come Marica Branchesi e Carlo Rovelli, biologi, come Maria Luisa Villa e Carlo Alberto Redi, filosofi della scienza, come Telmo Pievani e Giovanni Boniolo. E poi ancora, tra i primissimi, Roberto Cingolani, Silvio Garattini, Giuseppe Remuzzi, Nicola Bellomo, Paolo Vineis, Maria Pia Abbracchio, Patrizia Caraveo, Lucia Votano.

Un bello spaccato della comunità scientifica italiana che avanza una proposta chiara e precisa, nella speranza che, al di là delle divisioni politiche, venga accolta per il bene del Parlamento, della democrazia e dell'Italia intera.

Pietro Greco

Un gruppo di scienziati e giornalisti lancia l'appello *La scienza al servizio della democrazia* affinché il Parlamento italiano si doti di un Comitato per la scienza e la tecnologia

#ScienzaInParlamento

Dalla salute all'energia, dalla privacy on line alla sicurezza internazionale, la scienza e la tecnologia sono parte integrante di ogni decisione politica nelle società contemporanee. È importante quindi che anche il Parlamento italiano, come già avviene in molte altre democrazie avanzate, si doti di una struttura che garantisca un servizio efficiente di documentazione e consulenza scientifica al servizio dell'attività legislativa.

Se ci guardiamo intorno, molti paesi, europei e non, hanno da tempo strutture di questo tipo. Le troviamo per esempio in Francia, Germania, Olanda, Austria, Norvegia, Svizzera, Danimarca. Tra questi uffici, uno dei più noti è il Parliamentary Office of Science & Technology (POST) del Parlamento britannico, attivo dal 1989. Anche il Parlamento Europeo può contare su una simile struttura (STOA). Spagna, Messico e Cile hanno recentemente promosso iniziative volte alla costituzione di strutture di questo tipo, e gli Stati Uniti stanno riavviando una funzione di consulenza scientifica al Congresso dopo anni di inattività. Perché quindi non istituirla anche in Italia?

Vi sono molti casi che suggeriscono il bisogno di istituire un ufficio parlamentare di consulenza scientifica in Italia. Si pensi a leggi su temi di primaria importanza come le politiche energetiche e ambientali, le infrastrutture e le telecomunicazioni, le politiche sanitarie e gli inevitabili risvolti bioetici. Pensiamo anche al problematico dibattito sulle vaccinazioni, le deliberazioni restrittive prese in Italia in merito alla sperimentazione animale e la lunga sequela di «cure del miracolo», dal caso Di Bella alla «cura Vannoni», che hanno coinvolto anche le nostre istituzioni e parti politiche in uno scontro in cui la scienza è stata messa da parte ai danni dei cittadini.

Questi uffici possono avere sia un ruolo *reattivo*, fornendo consulenza scientifica su questioni particolari sotto richiesta dei rispettivi parlamenti, sia *proattivo*, nel senso che si occupano anche di approfondire e proporre temi a contenuto scientifico e tecnologico su cui gli organi parlamentari sono chiamati a esprimersi: il clima, le scelte energetiche, le implicazioni dello sviluppo dell'intelligenza artificiale, dei big data e dell'ingegneria genetica, l'esplorazione dello spazio hanno bisogno di più scienza e competenze.

Nel contesto del dibattito democratico, la disponibilità di informazioni scientifiche attendibili, coerenti e sistematiche è fondamentale come base per la presa di decisioni equilibrate ed efficaci. Proprio per questa ragione, in molte democrazie nel mondo consulenti scientifici esperti interni o esterni ai Parlamenti preparano note informative o rapporti di studio, in modo da offrire ai rappresentanti dei cittadini un chiaro panorama sullo stato del dibattito e degli attuali confini della conoscenza scientifica per ogni possibile oggetto di deliberazione, promuovendo quindi un dialogo virtuoso fra politica e ricerca scientifica.

Dal nostro punto di vista di persone attive nella scienza, nell'informazione e attente alla politica ci appelliamo quindi a tutte le forze politiche e sociali perché anche il Parlamento italiano si doti di una struttura di consulenza e documentazione scientifica indipendente al servizio della democrazia, per permettere decisioni solide e informate per il futuro del nostro Paese.

I coordinatori dell'iniziativa «Scienza in Parlamento»
Ruggero G. Bettinardi, Alessandro Allegra, Casimiro Vizzini, Chiara Sabelli, Luca Carra, Marco Cattaneo, Pietro Greco

Primi firmatari

Roberto Cingolani,
direttore Istituto italiano di tecnologia, Genova
Carlo Rovelli,
Università di Aix-Marsiglia
Silvio Garattini, presidente Istituto Mario Negri
Giuseppe Remuzzi, direttore Istituto Mario Negri
Marica Branchesi,
Gran Sasso Science Institute
Carlo Alberto Redi,
Università di Pavia, Accademia dei Lincei
Telmo Pievani, Università degli Studi di Padova
Nicola Bellomo,
Politecnico di Torino, presidente Gruppo 2003 per la ricerca
Paolo Vineis,
Imperial College, Londra, Consiglio superiore di Sanità
Giovanni Boniolo,
Università degli Studi di Ferrara
Maria Luisa Villa,
già Università degli Studi di Milano, Accademia della Crusca
Maria Pia Abbracchio,
prorettore vicario Università degli Studi di Milano
Patrizia Caraveo,
Istituto nazionale di astrofisica, Milano
Lucia Votano,
Laboratori nazionali di Frascati, Istituto nazionale di fisica nucleare
Andrea Grignolio e *Guido Silvestri*
a nome del «Patto Trasversale per la Scienza»
Antonio Guarino, University College London
Piero Genovesi, ISPRA
Paola Bonfante,
Università degli Studi di Torino
Francesca Pasinelli,
direttore generale Fondazione Telethon.

Il fisico Gérard Mourou racconta il suo percorso dalla ricerca di base a quella applicata fino al massimo riconoscimento per uno scienziato

Un premio Nobel sull'onda del laser

Per Gérard Mourou è stato un po' come andare a trovare dei figli ormai cresciuti. Di recente il fisico premio Nobel nel 2018 ha fatto visita al Politecnico di Milano e a Quanta System, azienda di Samarate, in provincia di Varese, leader mondiale in ricerca e produzione di tecnologie laser. E in ciascuna delle due occasioni lo scienziato è stato accolto con entusiasmo da un pubblico numeroso composto di operai, dirigenti, studenti e professori. A metà degli anni ottanta Mourou, insieme a Donna Strickland, ha inventato una tecnica per ottenere brevi impulsi laser ad alta intensità. Da allora la *chirped pulse amplification* (CPA) ha fatto molta strada e oggi ha applicazioni importanti, come riconosciuto anche nelle motivazioni del Nobel. E molta strada ha fatto anche la fama di Mourou, come ha testimoniato nel suo piccolo il capannello di persone a cui lo abbiamo dovuto strappare a Samarate per intervistarlo dopo un evento aziendale.

Come funziona la tecnica CPA?

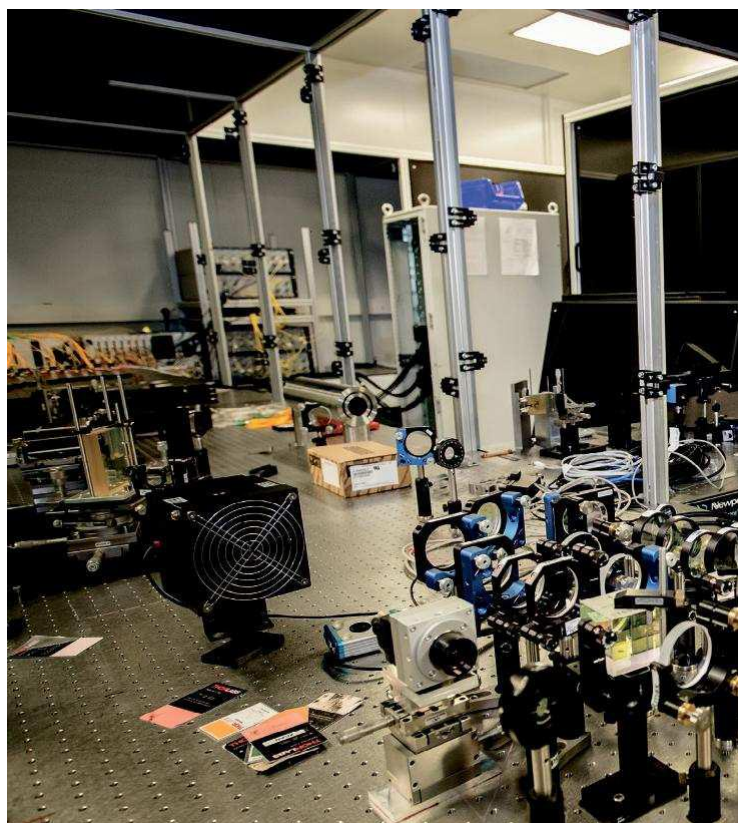
Cerchiamo di produrre brevi impulsi laser con intensità più grande possibile. Nella CPA, prima allunghiamo di diversi ordini di grandezza nel tempo un impulso breve, in modo da ridurre la sua potenza di picco, poi lo facciamo passare in un amplificatore, infine comprimiamo l'impulso amplificato, che in questo modo torna di breve durata ed è più intenso. Così evitiamo di danneggiare l'amplificatore nel caso in cui gli impulsi in entrata siano troppo intensi.

Il laser è stato inventato negli anni sessanta, è curioso che non ci sia pensato prima.

Sì, ma non è una cosa ovvia, perché prima bisogna produrre questi brevi impulsi, poi bisogna allungarli, amplificarli e comprimerli. All'epoca non ci si pensava, si effettuava un'amplificazione diretta, cioè si inizia con impulsi brevi e si amplifica nel mezzo usato.

Quando lavorava alla sua tecnica immaginava che avrebbe avuto un impatto così grande?

No, non lo immaginavo affatto. Le grandi applicazioni erano assai poche, non pensavamo per esempio a un uso per accelerare particelle con impulsi brevi, che è un impiego molto importante ora, e a roba simile. Quindi la CPA ora ha molte applicazioni che non immaginavamo.

Le applicazioni principali sono quelle biomedicali? Per esempio quella tanto pubblicizzata per interventi per correggere la miopia con il laser?

No. Voglio dire, prima di tutto ci sono applicazioni importanti in fisica fondamentale, perché per esempio si possono riprodurre condizioni che si trovano nelle stelle, in termini di temperature e così via. E ora possiamo produrre quelle condizioni in laboratorio in quella che chiamiamo astrofisica da laboratorio. Sono grandi applicazioni. Poi ci sono le altre, molto comuni, per esempio quelle sfruttate nella fabbricazione di strutture alle microscale con laser a femtosecondi, sono cose molto delicate.

Riguardo la fisica delle particelle, pensa che la sua tecnica possa portare a nuovi esperimenti?

Sì, perché finora la fisica delle alte energie è stata fatta accelerando particelle. È il motivo per cui costruiamo acceleratori. Per studiare la fisica fondamentale. Ora potremmo voler cambiare particelle come elettroni e protoni con fotoni, con il laser.

di Giovanni Spataro

CHI È

GÉRARD MOUROU

È nato nel 1944 ad Albertville, in Francia. Nel 1967 si è laureato in fisica all'Università di Grenoble, nel 1973 ha ottenuto il PhD dall'Università Paris-VI (Università «Pierre et Marie Curie»).

In seguito si è trasferito negli Stati Uniti ed è diventato professore all'Università di Rochester, dove insieme a Donna Strickland ha lavorato alla tecnica CPA per la quale entrambi nel 2018 hanno ricevuto il Nobel per la fisica.

Successivamente si è trasferito all'Università del Michigan, dove attualmente è professore e dove nel 1990 ha fondato il Center for Ultrafast Optical Science. È anche professore all'École Polytechnique di Palaiseau, in Francia.

Al lavoro. Mourou in laboratorio con un tavolo ottico. Il fisico ha inventato una tecnica per generare impulsi laser assai intensi.

La sua storia sembra perfetta per i politici, per spiegare il passaggio dalla ricerca di base a quella applicata. Ha qualche consiglio per loro?

Sì, penso che la ricerca sia assai importante. La vedo come una locomotiva che trascina tutte le carrozze che ha dietro. Prima c'è la ricerca di base, poi quella applicata. Abbiamo bisogno della ricerca fondamentale per fare scoperte, poi si trovano le applicazioni. Abbiamo bisogno di questi motori per trascinare il vagone della società. Questa è la mia visione della ricerca.

A Stoccolma lei ha detto «il meglio deve ancora venire», che cosa intendeva?

Volevo dire che proprio ora che il mio settore va alla grande stiamo limitando la potenza dei laser ai petawatt (10^{15} watt), ma dobbiamo arrivare agli exawatt (10^{18}). E vorremmo farlo non solo nel visibile, come già facciamo, ma anche nei raggi X.

Lei ha ricevuto il Nobel insieme a Donna Strickland, con la quale ha lavorato. È solo la terza donna ad aver ottenuto il Nobel per la fisica dal 1901. C'è un problema di genere nella scienza?

Sì, tutti lo sanno. E penso che quest'anno il comitato per il Nobel abbia voluto cambiare questa situazione. Tuttavia penso che Donna Strickland abbia ricevuto il premio Nobel non perché è una donna, ma perché è stata brava.

Il rapporto di fiducia tra opinione pubblica e comunità scientifica sembra si sia incrinato, almeno in parte. Che cosa ne pensa?

Alcune persone diffidano della scienza semplicemente perché non capiscono l'approccio scientifico. Penso che la scienza sia bellissima e sia qualcosa di fondamentale.

La scienza cerca di capire da sempre da dove veniamo, chi siamo e così via, e dove stiamo andando. Sono domande fondamentali, che dovrebbe farsi chiunque.

In Italia, e non solo, ci sono movimenti contro i vaccini, persone che rifiutano soluzioni tecnologiche che migliorerebbero in prospettiva la loro vita. C'è qualcosa in più che gli scienziati possono fare rispetto a questo rifiuto?

Se ci pensate un attimo, 200 anni fa o anche 100 anni fa la durata della vita era molto più piccola rispetto a oggi. L'aumento registrato in questo arco di tempo è stato dovuto alla conoscenza che abbiamo accumulato. Oggi noi beneficiamo di un grande periodo della scienza. Le persone che non credono nella scienza dovrebbero mettersi in discussione, perché siamo ovviamente circondati dai suoi benefici.

Non avere fiducia in tutto questo è come non avere fiducia nell'aria che respiriamo, nella Terra su cui camminiamo. È un fatto ovvio che la scienza sia ovunque e che dia benefici considerevoli agli esseri umani.

È vero che ha avuto un «momento Eureka» per la sua tecnica quando era su uno skilift sulle montagne del Colorado, negli Stati Uniti?

Assolutamente sì. In quel periodo lavoravo alla chirped pulse amplification. Cercavo di prendere gli impulsi brevi, allungarli e amplificarli e ricomprimerli. Il problema era che volevamo ricomprimerli esattamente come li avevamo allungati. Dovevamo capire potevamo farlo. E ho avuto l'idea mentre ero sullo skilift.

Un contenitore separa gli oli vegetali esausti dagli altri rifiuti di casa e in futuro potrebbe differenziare carta, plastica, vetro e organico

Un bidone intelligente per i rifiuti

A volte le delusioni possono trasformarsi in opportunità. I soci di aTon ne sono convinti: dopo aver lavorato a lungo e per diverse realtà a progetti di ricerca e sviluppo, sia europei sia nazionali, hanno deciso di fondare la loro *start-up* per andare ben oltre la fase di prototipo e arrivare sul mercato. «Le nostre esperienze passate ci hanno ispirato, ma volevamo fare qualcosa di più, ideare e sviluppare un prodotto e misurarci con il mercato», spiega Paolo Sperandio, amministratore unico di aTon. Insieme a lui, ingegnere elettronico specializzato in microelettronica e telecomunicazioni, a fondare l'azienda nel 2013 ci sono Pierpaolo Loreti e Alessandro Catini, anche loro ingegneri elettronici. Ai quali nel 2016 si aggiunge Massimiliano De Luca, ingegnere elettronico sì, ma con un amore per la meccanica.

L'idea iniziale è lavorare sulla raccolta differenziata dei rifiuti, croce e delizia delle amministrazioni comunali che devono implementare politiche per promuoverla e trovare soluzioni per attuarla. «Siamo partiti dal nostro territorio, il Lazio, dove molti comuni lavoravano su questo tema», racconta Sperandio. «Ma sempre con soluzioni piuttosto difficili e farraginose: migliaia di volantini lasciati nei condomini per spiegare quali rifiuti mettere in quali bidoni. I cittadini li leggono, ma poi si scordano. A volte poi le regole cambiano e bisogna iniziare tutto da capo». Insomma, se la raccolta differenziata non funziona o fatica a decollare è anche perché il sistema non è sempre intuitivo.

La prima tappa

Gli ingegneri di aTon pensano, però, di avere la soluzione: un bidone che riconosca da solo che tipo di rifiuto è quello che si getta dentro – carta, plastica, vetro e organico – e lo divida di conseguenza. L'obiettivo è ambizioso, forse troppo per essere il primo. Così, dopo aver presentato l'idea all'agenzia regionale per l'innovazione – al tempo Filas, oggi Lazio Innova – gli ingegneri decidono di restringere il campo e di risolvere, come prima tappa del percorso, il problema dello smaltimento dell'olio vegetale. Per intenderci: parliamo dell'olio usato per friggere, di quello contenuto nelle scatolette di tonno e in generale negli alimenti sott'olio.

«In molti sanno che questo olio non va gettato nel lavandino o nel water, ma poi immancabilmente è quello che si fa. Andrebbe conservato e poi conferito negli appositi contenitori nelle isole ecologiche, ma sono davvero pochi quelli che lo fanno», sottolinea Sperandio. Non parliamo degli esercizi pubblici, come i ristoranti, per i quali esistono sistemi di raccolta specifici e leggi ben chiare, ma di quello prodotto dai cittadini. Poca cosa si dirà, ma dati alla mano si scopre che il 64 per cento della produzione annuale totale di olio vegetale esausto, cioè circa 166.000 tonnellate, proviene proprio dalle utenze domestiche. Se non smaltito correttamente, questo olio domestico si accumula nelle tubature formando ostruzioni che da una parte rovinano le condutture e causano danni, dall'altra sono un nutrimento prezioso per animali che non vorremmo abitassero vicino a noi, come ratti o blatte. Di più, se l'olio esausto raggiungesse sorgenti d'acqua potabile l'inquinamento sarebbe assicurato: basta un litro di olio esausto per rendere non potabile l'acqua di una piscina olimpionica.

Infine, se l'olio arrivasse negli specchi d'acqua naturale, come i laghi, creerebbe uno scudo in grado di impedire il normale scambio di gas e di luce necessari per la vita della flora e della fauna locale. «Ma c'è anche una buona notizia: dall'olio esausto, se raccolto correttamente, si possono ricavare biodiesel e glicerina, due materie prime molto preziose», spiega Sperandio. La soluzione

porpeller/Getty Images (*padella*); cortesia Aton (*contenitore*)

di Letizia Gabaglio

A margine del fritto. L'olio esausto, per esempio quello che resta alla fine di una frittura, può inquinare sorgenti di acqua potabile. Il bidone intelligente di aTon (*a destra il primo prototipo*) aiuta a separarlo in modo corretto dagli altri rifiuti.

LA SCHEDA - ATON

Azienda fondata nel 2013

Persone di riferimento: Ing. Paolo Sperandio, PhD (amministratore unico)

Sito: www.aton-srl.it **Mail:** info@aton-srl.it

Numero di brevetti: 1

Dipendenti-collaboratori-soci: 5

per raccogliere correttamente l'olio è greenBag, il primo prodotto aTon ad arrivare sul mercato: un contenitore intelligente che riconosce, separa e quantifica i liquidi che vengono conferiti in esso.

Il cittadino versa il suo liquido nel contenitore, che riesce a capire di che cosa si tratta valutandone parametri fisici e chimici. «Il contenitore riconosce il rifiuto e lo indirizza nel bidone giusto, olio vegetale esausto da una parte, tutto il resto dall'altra», va avanti Sperandio. «Così si ha la certezza di avere uno scarto puro che può essere lavorato facilmente». Il sistema ha anche un'*app* che traccia i conferimenti, permettendo quindi di abbinare l'utente al suo olio, e un sistema di controllo e monitoraggio in grado di aiutare l'azienda che gestisce i rifiuti nelle fasi di raccolta e trasporto.

GreenBag è ormai una realtà e aTon ha cominciato a farsi conoscere in Italia, partendo dalla Regione Lazio e rivolgendosi alle amministrazioni locali e a quelle aziende che hanno interesse a smaltire l'olio esausto in maniera semplice ed efficace, e all'estero, arrivando nel 2017 fino in Cina. «Le prime soddisfazioni cominciano ad arrivare, ma il lavoro non è finito e può essere fatto molto per migliorare la soluzione», ricorda Sperandio, che proprio a febbraio, al Consiglio nazionale delle ricerche di Napoli, durante la XX Conferenza nazionale dell'Associazione italiana sensori e microsistemi, ha presentato un'evoluzione di greenBag.

Questa nuova versione riconosce il rifiuto grazie a una sistema ottico: «Il liquido versato nel bidone è irradiato con una luce a LED a diverse lunghezze d'onda, creando una risposta che caratterizza il rifiuto in tutto lo spettro», spiega Sperandio. Ma i giovani ingegneri non si fermano e lavorano – grazie a un finanziamento della Regione Lazio vinto per il progetto Mr. Bin insieme ad altre due aziende del territorio e all'Università di Roma Tor Vergata – alla realizzazione del loro primo obiettivo, da cui erano partiti: un bidone intelligente che separa tutti i rifiuti. Il greenBag multimateriale, basato su una tecnologia il cui brevetto è in corso di presentazione, avrà uno sbocco commerciale direttamente al consumatore e, secondo le stime di aTon, se tutto andrà per il meglio, riuscirà a conquistare, entro i prossimi tre anni, il dieci per cento dell'attuale mercato dei sistemi di raccolta a livello mondiale.

Mai fermarsi di fronte a una delusione. Potrebbe essere una grande occasione sprecata.

di Piergiorgio Odifreddi

professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e *visiting professor* alla Cornell University di Ithaca (New York)

Leonardo matematico

Il grande artista del Rinascimento si cimentò anche in matematica, sebbene non fosse molto ferrato in materia

Cinquecento anni fa, il 2 maggio 1519, moriva Leonardo da Vinci, uno dei grandi artisti del Rinascimento. Tuttavia non uno dei grandi scienziati della storia, nonostante la sua leggendaria agiografia lo presenti come un genio universale. L'equivoco nasce dal fatto che i suoi celebri codici erano zeppi di appunti enciclopedici e di schizzi fantasiosi, troppo spesso ottimisticamente interpretati come progetti di macchine avveniristiche.

La quadratura non torna

Il più famoso di questi disegni, oggetto di molte imitazioni e riprodotto sulla nostra moneta da un euro, è il cosiddetto *Uomo vitruviano*, che fin dal nome rivela le sue origini classiche: verso il 1490 Leonardo lesse infatti il *De architectura* di Vitruvio, un brano del quale lega le proporzioni dell'uomo al quadrato e al cerchio, rispettivamente simboli della Terra e del Cielo.

Le note scritte a mano da Leonardo attorno al disegno descrivono queste proporzioni nel dettaglio. Il centro del quadrato si trova nei genitali, mentre il lato è pari sia all'altezza sia all'apertura delle braccia. Il centro del cerchio si trova nell'ombelico, mentre la circonferenza è determinata sia dalle braccia aperte all'altezza del capo, sia dalle gambe aperte a formare internamente un triangolo equilatero. La posizione del piede sinistro, sorprendentemente parallela al piano del corpo, e un rigonfiamento all'altezza dell'inguine, indicano forse la presenza di un'ernia nel modello coinvolto per il disegno.

Anche a occhio si vede che il quadrato non ha la stessa area del cerchio, perché il suo lato è troppo corto: dunque, il disegno non può suggerire una soluzione del problema della quadratura, come spesso si favoleggia. Il lato del quadrato non è nemmeno legato in proporzione aurea al raggio del cerchio, perché è invece troppo lungo. Più precisamente, rispetto al raggio del cerchio il lato è lungo 1,656, mentre dovrebbe essere 1,618 per la proporzione aurea e 1,772 (cioè, la radice quadrata di π) per la quadratura.

I giusti riferimenti

Se si vogliono trovare riferimenti in Leonardo alla proporzione aurea, tanto vale cercarli dove ci sono: nelle famose illustrazioni per *De divina proportione* di Luca Pacioli, stampata a Venezia nel 1509. Le 60 tavole a colori di Leonardo costituiscono esercizi di prospettiva: una tecnica introdotta un secolo prima da Brunelleschi, e usata con maestria da Leonardo nella famosa *Ultima cena* e nell'incompiuta *Adorazione dei Magi*. Entrambi i dipinti sono organizzati secondo una prospettiva centrale, con l'unico punto di fuga situato nelle rispettive figure di Cristo e della Vergine.

Le tavole per Luca Pacioli sono invece più asettiche, e rappresentano solidi più o meno regolari in varie contrapposizioni: piena o scheletrica, intera o troncata, normale o stellata. A volte le rappresentazioni sono un po' sbilenche, e alcune sono semplicemente sbagliate: l'errore più sottile è nel dodecaedro troncato stellato, in cui una piramide pentagonale e le cinque piramidi triangolari che la attorniano (corrispondenti rispettivamente a una faccia del dodecaedro e ai suoi cinque vertici troncati) sono rappresentate con i vertici sullo stesso piano, mentre quello della piramide centrale dovrebbe sporgere leggermente dal piano degli altri cinque.

Non stupisce che l'artista Leonardo, non molto ferrato in matematica, abbia fatto questo errore: nei suoi codici abbondano i calcoli sbagliati, anche elementari. Stupisce invece che l'abbia fatto il matematico Pacioli, forse tratto in inganno da un modellino approssimato: se avesse fatto i calcoli precisi, non molto difficili, se ne sarebbe accorto. Ma questo non avrebbe aumentato l'enorme interesse del suo libro e delle illustrazioni di Leonardo.

di Telmo Pievani

professore ordinario di filosofia delle scienze biologiche
dell'Università degli Studi di Padova

Un premio evoluzionistico

Prima edizione del Premio internazionale Luigi Luca Cavalli-Sforza, in ricordo dell'illustre genetista

Quando si dice un pioniere. Partecipò ai primi studi italiani, negli anni quaranta, sulla genetica del moscerino della frutta e poi alle prime scoperte sul sesso nei batteri, cioè lo scambio orizzontale di pacchetti di informazione genetica tra batteri, insieme a mostri sacri come Ronald A. Fisher, statistico e tra i fondatori della genetica delle popolazioni, e il microbiologo Joshua Lederberg, Nobel nel 1958 a soli 33 anni. Poi fu tra i primi a insegnare in Italia genetica umana, intuendo che i geni recano con sé non solo informazioni cruciali di valore medico, ma anche preziose tracce della storia umana profonda e degli antichi spostamenti di popolazioni.

Non contento, gettò le basi tecniche delle analisi statistiche che si usano oggi per ricostruire la filogenesi di tutti gli esseri viventi. Insofferente tanto alle logiche accademiche quanto agli steccati disciplinari, inaugurò un metodo di lavoro interdisciplinare che univa analisi dei gruppi sanguigni, ricerca di marcatori genetici in popolazioni umane, registri parrocchiali, storia demografica, alberi genealogici, distribuzioni dei cognomi e delle toponomastiche. Nel 1971 lasciò l'Italia per insegnare genetica delle popolazioni e delle migrazioni a Stanford, dove assunse la guida di un programma di ricerca mondiale che mirava a ricostruire per via genetica l'albero genealogico dell'umanità. Oggi migliaia di ricercatori lavorano sulle spalle di questo gigante.

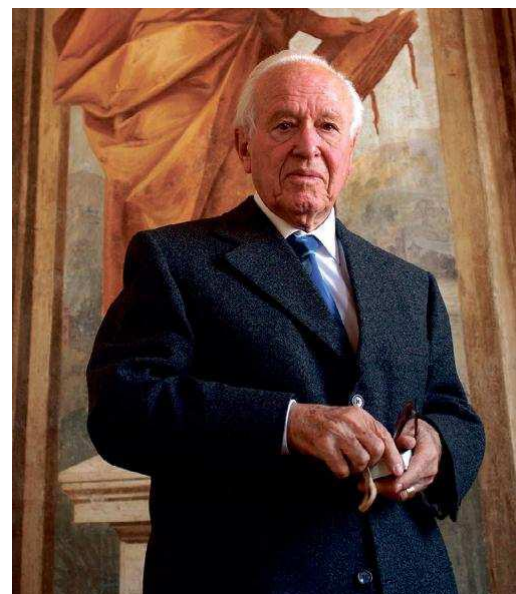
Un'origine africana

Le analisi sempre più raffinate sulla variabilità umana (sul DNA mitocondriale, sul cromosoma Y e poi sull'intero genoma) lo portarono a scoprire che la specie *Homo sapiens* ha avuto un'origine unica, africana e recente, confutando il vecchio modello che prevedeva centri multipli di origine graduale in differenti regioni. La sua idea, poi confermata e precisata, fu che una grande diaspora fuori dall'Africa aveva prodotto, circa 60.000 anni fa, il meraviglioso ventaglio delle popolazioni umane attuali e passate, diversificando i loro geni, ma anche le culture e le lingue del mondo. Siamo tutti parenti, tutti differenti, e tutti africani. Da Stanford propose anche la prima teoria quantitativa della trasmissione culturale.

Avrete capito che si tratta di Luigi Luca Cavalli-Sforza, l'illustre genetista scomparso all'età di 96 anni nell'agosto scorso. A un anno dalla morte, la Società italiana di biologia evoluzionistica, di cui era socio onorario, ricorderà questo maestro di pensiero scientifico (e di divulgazione) in occasione del suo ottavo congresso che si terrà a Padova, all'Orto botanico Patrimonio UNESCO e in Aula Magna Galileo Galilei, dal 1 al 4 settembre 2019. Lo farà istituendo, d'intesa con l'Associazione antropologica italiana, la prima edizione del Premio internazionale Luigi Luca Cavalli-Sforza, rivolto a scienziate e scienziati che abbiano dato un contributo eccezionale alle ricerche evoluzionistiche con il suo stesso stile innovatore.

Risposte originali

Il primo premiato sarà l'influente genetista Montgomery Slatkin, membro della statunitense National Academy of Sciences e professore all'Università della California a Berkeley. Slatkin è noto soprattutto per studi sul flusso genico e lo sviluppo di metodi per stimare parametri evolutivi da dati genetici e basati sulla teoria della coalescenza. Di recente ha studiato cause e conseguenze delle espansioni degli habitat delle specie, e l'evoluzione dei gruppi umani arcaici con dati di DNA antico.

Cavalli-Sforza diffidava delle astrattezze di certa filosofia, ma la sua curiosità e il suo fiuto di ricercatore lo hanno portato a rispondere in modo originale ad affascinanti e sempiterne domande filosofiche. Due fra tutte: chi siamo e da dove veniamo. La sua risposta è un intero programma di ricerca: benché la nostra mente si crogioli in confortanti «noi» dove si sente sovrana, ciascuno di noi è una storia di diversità.

Pioniere della genetica. Luigi Luca Cavalli-Sforza, scomparso il 31 agosto 2018 nella sua casa di Belluno all'età di 96 anni, è stato un pioniere della genetica delle popolazioni, dimostrando tra l'altro che il concetto di razza umana non ha alcun senso dal punto di vista scientifico.

Giuseppe Aresu/AGF

di Giorgio Manzi

ordinario di paleoantropologia alla Sapienza Università di Roma;
socio corrispondente dell'Accademia Nazionale dei Lincei

Il Neanderthal di La Chapelle

Uno scheletro scoperto agli inizi del Novecento continua a regalare dati importanti su questa specie umana

Un paio di mesi fa parlavamo della ricostruzione virtuale in 3D della gabbia toracica dello scheletro di un Neanderthal scoperto in una grotta del Monte Carmelo, in Israele: Kebara 2. Concludevamo che, sulla base di quello studio, si potranno sviluppare nuove ricerche. Neanche ci avessero ascoltato, un gruppo di ricercatori che fa capo all'Università di Zurigo ha appena pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» i risultati di una ricomposizione digitale delle vertebre e del bacino di un altro Neanderthal, europeo questa volta: La Chapelle-aux-Saints 1.

Gli autori ci hanno fornito informazioni tanto dettagliate quanto poco sorprendenti, concludendo che i Neanderthal avevano, come noi, un andamento sinuoso (cifosi e lordosi) della colonna vertebrale, e quindi una postura molto simile alla nostra. Il risultato è comunque interessante, sia perché su questo tema ci sono stati, anche di recente, dati e pareri contrastanti sia perché si basa su uno scheletro che da questo punto di vista, e non solo da questo, ha fatto storia.

Sepoltura intenzionale?

Il sito dove fu scoperto si trova nel sud della Francia, in Nuova Aquitania, nei pressi della cittadina di La Chapelle-aux-Saints, da cui il fossile prende il nome. È una piccola grotta, poco più di un riparo sotto la roccia, chiamata La Bouffia Bonneval.

Nel 1908, i tre fratelli Bouyssonie (due di loro erano sacerdoti) vi scoprirono larga parte dello scheletro di un individuo anziano di morfologia neanderthaliana. Con il tipico cranio allungato, le orbite sormontate da rilievi ossei e le mascelle quasi del tutto prive di denti per l'età avanzata dell'individuo, lo scheletro giaceva rannicchiato in una fossa. Fu interpretato come una sepoltura intenzionale e ancora oggi è uno dei pochi casi del genere fra i Neanderthal. Recenti interventi di riscavo e di analisi del sito sembrano dimostrarlo, ma sono stati contestati. Hanno anche portato alla luce nuovi resti dello stesso scheletro e reperti isolati che indicano la presenza di altri quattro individui (fra cui due bambini), e hanno fornito datazioni comprese tra 60.000 e 45.000 anni dal presente, l'epoca dei Neanderthal cosiddetti «classici».

L'anello mancante che non c'è

E davvero «classica» è la morfologia di La Chapelle-aux-Saints 1. Fu questo lo scheletro, infatti, per cui venne pubblicata nel 1913 la prima estesa monografia su un esemplare di *Homo neanderthalensis*. Se ne occupò Marcellin Boule, forse il più grande paleoantropologo francese fra Ottocento e Novecento.

In un volume degli «Annales de Paléontologie», Boule descrive minuziosamente cranio e ossa dello scheletro, presentandoli come i resti di una creatura dalla colonna vertebrale uniformemente ricurva (come in gorilla e scimpanzé) e dagli arti inferiori semi-flessi. Ci vorranno molti anni per capire che questa ricostituzione era fuorviante – e l'articolo appena pubblicato ne è l'ultimo atto – influenzata da errori nel restauro di parti mancanti (per esempio alla base del cranio) o dalle evidenti caratteristiche patologiche dell'individuo, fra cui i segni di una grave forma di artrite.

Ma io credo che la ricostruzione di Boule, per altri versi così accurata ed esemplare, sia stata soprattutto condizionata dai preconcetti dell'epoca, durante la quale ancora si risentiva del mito ottocentesco dal cosiddetto «anello mancante». In mancanza di meglio, i Neanderthal e quel Neanderthal francese, in particolare, potevano rappresentare l'attesa forma di transizione che, gradualmente, avrebbe portato a noi. Non dimentichiamoci che, proprio in quegli stessi anni, gli inglesi perdevano la testa per un altro presunto anello mancante. Quello che passerà alla storia come la «frode di Piltdown».

di Amedeo Balbi

professore associato di astronomia e astrofisica
al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

La lunga vita di Opportunity

Terminata la sua missione, riuscita oltre ogni aspettativa, il rover della NASA su Marte lascia un'eredità importante

Il 13 febbraio scorso, la NASA ha annunciato ufficialmente che il *rover* marziano Opportunity ha smesso di funzionare, e che la sua missione è conclusa. Era arrivato sul Pianeta Rosso nel 2004, poco dopo il suo gemello Spirit. Entrambi erano stati progettati per una missione di tre mesi, e per muoversi di poche centinaia di metri dal punto di ammartaggio, ma hanno resistito ed esplorato molto di più.

Spirit è stato il primo a cedere. Nel 2009, dopo aver percorso quasi otto chilometri, si è incagliato nella sabbia, in una posizione che ha impedito ai pannelli solari di ricaricare le batterie, e ha smesso di comunicare definitivamente nel 2010. Opportunity ha tenuto duro per quasi 15 anni, percorrendo oltre 45 chilometri sul suolo marziano. Non è molto in termini terrestri: poco più di una maratona, e molto meno del perimetro del Grande raccordo anulare di Roma. Ma è un record per l'esplorazione planetaria.

Meraviglie di un ambiente ostile

Anche 15 anni sono un'enormità. Pensate a come era il mondo nel 2004: niente *smartphone* né *social network*, per dire. Alcuni degli scienziati che erano nella sala controllo missione a dare l'addio a Opportunity andavano ancora al liceo quando il rover è sceso su Marte. Insomma, è una bella durata in assoluto, figuriamoci nell'ambiente ostile di un altro pianeta.

In effetti, Opportunity se l'è vista brutta diverse volte. Nel 2005 è rimasto impantanato nella sabbia, ma a differenza di Spirit è riuscito a venirne fuori, grazie a una serie di manovre attentamente simulate sulla Terra per settimane. Nel corso degli anni, è sopravvissuto ai duri inverni marziani andando in letargo, e ha combattuto contro le tempeste di sabbia, sfruttando i forti venti per rimuovere la polvere dai pannelli solari.

Nel frattempo, ha fatto moltissimo per aiutarci a capire le condizioni presenti e passate del pianeta. Fin dai primi fortunati giorni di missione, nei pressi di un piccolo cratere le cui rocce hanno subito rivelato tracce di sedimenti, prodotti, miliardi di anni fa, dalla presenza di acqua liquida. Per arrivare al grande cratere Endeavour, dove Opportunity ha scoperto altri sedimenti e argille, le prove di un passato marziano compatibile con la presenza di organismi viventi. Ci sono poi le immagini dettagliate della superficie, oltre 200.000 foto di eccezionale qualità, che ci hanno mostrato scorci di Marte mai visti prima, inclusi alcuni tra i panorami più emozionanti mai ripresi su un altro pianeta.

Un pioniere marziano

Ma gli anni passano anche per i robot. Qualche anno fa, Opportunity ha iniziato a accusare problemi di memoria. Alla fine, l'ultima tempesta di sabbia, iniziata nel 2018, è stata fatale. La polvere ha oscurato a lungo il cielo, e il rover, senza energia solare per ricaricare le pile, è andato in ibernazione. Quando la tempesta è cessata, però, Opportunity non ha più dato segni di vita. Con l'inverno marziano alle porte, e dopo oltre mille tentativi falliti di rianimare il rover, i tecnici NASA hanno dovuto prendere atto che non c'era più niente da fare. Senza un'alimentazione interna e un adeguato riscaldamento, le apparecchiature non potranno sopravvivere ai picchi negativi di temperatura (fino a -100 °C) che si raggiungeranno nei prossimi mesi.

Resta un'eredità importante: aver aperto, assieme a Spirit, la strada per l'esplorazione semovente del suolo marziano. Un testimone raccolto non solo dal rover della NASA Curiosity, attualmente operante sul pianeta (che dal 2012 ha già percorso oltre 20 chilometri), ma anche, in futuro, dal rover Exomars dell'Agenzia spaziale europea (recentemente ribattezzato Rosalind Franklin), che dovrebbe partire nel 2020.

Guardando indietro. Il bordo occidentale del cratere Endeavour su Marte, in un'immagine scattata da Opportunity e nella quale si notano anche le tracce lasciate dal rover della NASA durante il suo tragitto.

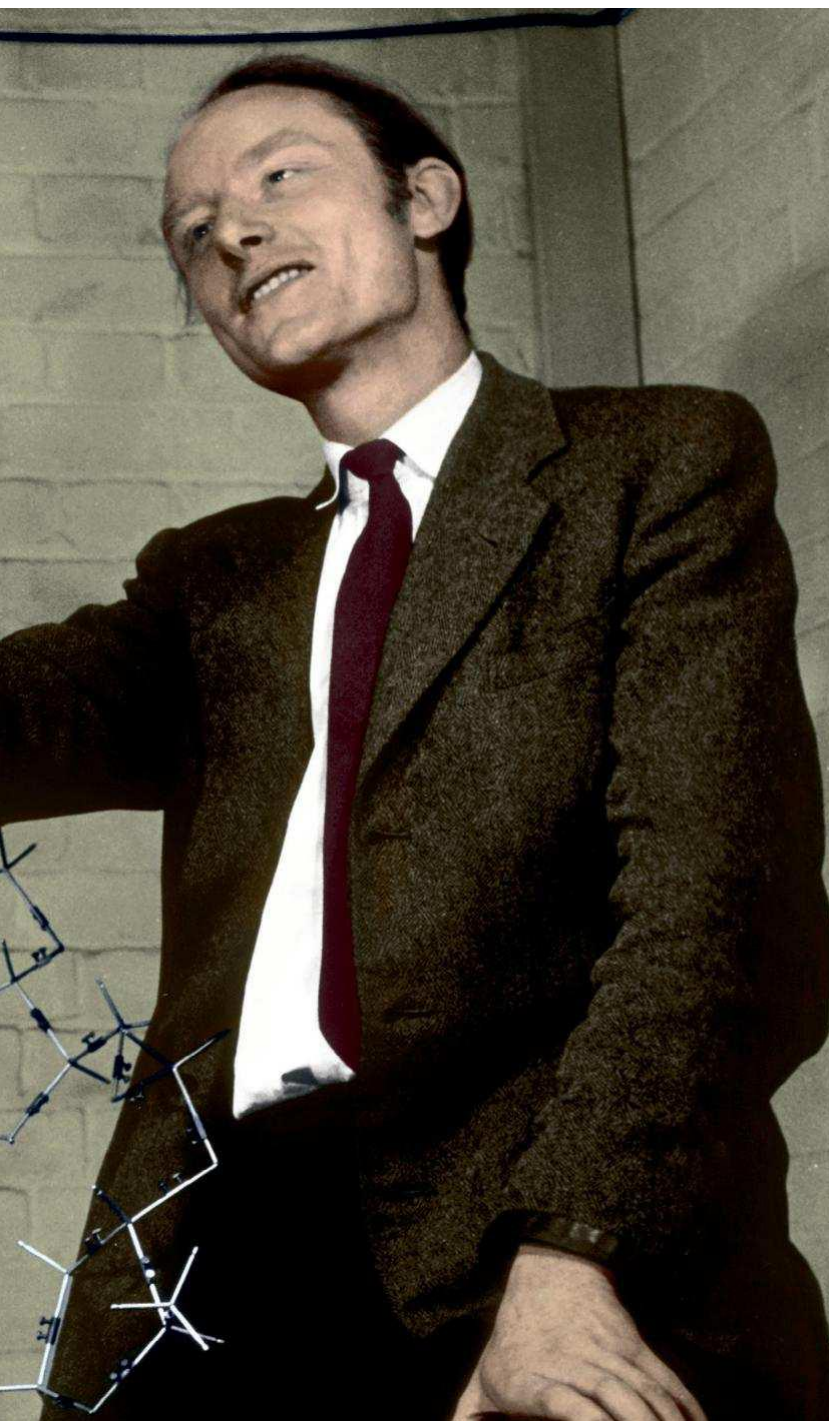
Cortesia NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASU

BIOLOGIA SINTETICA

Hachimoji, il DNA a otto lettere

Realizzato inserendo due coppie di basi artificiali, crea doppie eliche stabili

Science Photo Library/AGF

Gli scopritori.
In questa famosissima fotografia, Francis Crick e James Watson sono ripresi accanto a un modello della struttura a doppia elica del DNA composta da quattro basi, da loro scoperta nel 1953.

L'alfabeto genetico a quattro lettere che caratterizza ogni forma di vita sulla Terra non è speciale né unico: altre forme di DNA sono altrettanto capaci di conservare e trasmettere l'informazione genetica. Steven Benner, fondatore della Foundation for Applied Molecular Evolution in Florida, mostra su «Science» il primo DNA sintetico formato da otto basi, che sembra funzionare: crea doppie eliche stabili e, con un enzima apposito, viene trascritto in RNA. In aggiunta alle due coppie di basi usuali, adenina/timina e guanina/citosina, Benner ne ha inserite altre due, chiamate S/B e P/Z2, ricavate modificando le basi naturali. Il DNA che ne risulta è stato chiamato «hachimoji», che in giapponese significa appunto «otto lettere».
Sebbene altre basi innaturali siano state aggiunte al DNA in passato, Benner e i suoi collaboratori sono i primi a mostrare basi sintetiche che si appaiano regolarmente fra loro con gli stessi legami idrogeno delle basi naturali, e possono intercalarsi a queste in qualunque sequenza creando sempre doppie eliche stabili. In alcuni tentativi precedenti, le basi sintetiche, oltre a essere solo due, si appaiavano con legami di altro tipo, e perciò la doppia elica era stabile solo se quelle basi sintetiche erano distanziate fra loro. Il DNA hachimoji permette invece variazioni di sequenza senza vincoli, che potrebbero sostenere una variazione evolutiva come il DNA naturale. Inoltre – aspetto cruciale – questo DNA è trascritto correttamente in un RNA hachimoji, grazie a una polimerasi virale modificata per poter leggere le otto basi. Resta ancora da dimostrare, invece, l'altra proprietà fondamentale: che il DNA sintetico possa anche essere replicato dalle polimerasi della cellula per trasmettere l'informazione genetica di generazione in generazione.
In ogni caso, il DNA hachimoji fa pensare che la vita non dovesse per forza evolversi con un codice genetico a quattro lettere; su altri pianeti, organismi con una biochimica simile alla nostra potrebbero comunque usare un DNA diverso, e Benner sta già testando fino a che punto l'alfabeto genetico possa espandersi, sperimentando DNA a dieci e a 12 lettere.
Sul piano pratico, il DNA hachimoji potrebbe diventare la base di sistemi genetici che sintetizzino RNA e proteine con componenti inediti. Altri DNA sintetici sono già stati usati per codificare proteine con amminoacidi aggiuntivi, oltre ai 20 naturali, e il DNA hachimoji potrebbe fare lo stesso in modo ancora più potente e versatile. In più, DNA e RNA sintetici potranno trovare applicazioni dirette: Benner ha già realizzato DNA a sei basi che si legano ai virus dell'epatiti B e C e all'HIV e sono utilizzati in test diagnostici, e sta studiando altre sequenze capaci di legarsi a vari agenti biologici a scopi diagnostici e terapeutici.

Giovanni Sabato

FISICA

«Galileo» conferma la relatività generale

Verificata grazie alle orbite «sbagliate» di due satelliti del sistema europeo

Grazie a un lancio andato storto, la teoria generale della relatività ha raccolto un'ulteriore conferma della sua validità. A offrire ai ricercatori lo spunto per un nuovo test della teoria di Albert Einstein sono stati due satelliti della costellazione Galileo, il sistema satellitare europeo di supporto alla navigazione equivalente al GPS statunitense, lanciati ad agosto 2014 ed entrati per errore in orbite sbagliate. Così, invece di trovarsi su orbite circolari e quindi a un'altezza stabile dalla superficie terrestre, si sono trovati a percorrere orbite ellittiche.

Traiettorie di quel tipo non sono utilizzabili dai sistemi di navigazione satellitare, ma piuttosto che considerare il lancio fallimentare, due gruppi di ricercatori – il primo guidato da Pacôme Delva dell'Osservatorio di Parigi, in Francia, l'altro da Sven Herrmann dell'Università di Brema, in Germania – hanno sfruttato le orbite ellittiche dei due satelliti per verificare il fenomeno noto come *redshift* gravitazionale.

Questo fenomeno consiste nel fatto che un orologio scandisce il tempo a una velocità dipendente dall'intensità del campo gravitazionale in cui è immerso. In particolare, più è intenso il campo, più lenta è la scansione del tempo.

I ricercatori hanno misurato la dilatazione temporale osservata quando i due satelliti passavano al perigeo, il punto più vicino alla Terra della loro orbita, rispetto a quando passavano all'apogeo, il punto più lontano, impiegando gli orologi atomici estremamente precisi montati a bordo dei satelliti.

Come descritto nei due studi pubblicati sulle «Physical Review Letters», dopo tre anni di monitoraggio, i due gruppi non solo hanno verificato il fenomeno, ma hanno anche migliorato di oltre cinque volte la precisione della misura con cui era stato osservato nel 1976 dal satellite Gravity Probe A, appositamente lanciato allo scopo.

Emiliano Ricci

Quark senza più segreti

Un mistero di lunga data legato ai quark – le particelle che costituiscono tra l'altro protoni e neutroni dei nuclei atomici – è stato finalmente svelato. Nel 1983, un esperimento del CERN di Ginevra aveva rivelato che i quark si muovono molto più lentamente all'interno del nucleo di un atomo di ferro, molto ricco di protoni e neutroni, rispetto a quello che accade in un nucleo di deuterio, che contiene solo un protone e un neutrone. In seguito, era diventato chiaro che il comportamento è generale: più è grande il nucleo, più i quark sono lenti.

Per anni i fisici hanno cercato di spiegare questa particolare proprietà, ma senza risultati soddisfacenti. Ora però i ricercatori della collaborazione CLAS, un esperimento dell'acceleratore di particelle CEBAF al Jefferson Laboratory, negli Stati Uniti, hanno trovato una conferma sperimentale a una delle ipotesi più accreditate per spiegare il fenomeno.

All'interno di un nucleo può accadere che protoni e neutroni si leghino formando «coppie», dette SRC (*short-range correlated*): un processo temporaneo ma molto intenso, che ha l'effetto di aumentare il volume di spazio a disposizione dei quark. A livello quantistico è noto che un oggetto si muove tanto più lentamente quanto più spazio ha a disposizione: di conseguenza la presenza di molte coppie SRC, che si osserva nei nuclei più grandi, porta a una minore velocità media dei quark.

I ricercatori dell'esperimento CLAS – che hanno pubblicato i loro risultati su «Nature» – sono riusciti a rivelare la presenza di coppie SRC bombardando nuclei di elementi di dimensioni molto diverse tra loro (dal pesante piombo fino al deuterio, assai leggero) con fasci di elettroni, calcolando la velocità dei quark per ogni tipo di nucleo e verificando una differenza di velocità del 20 per cento a favore dei quark del deuterio (meno ricco di coppie) rispetto a quelli degli elementi più pesanti. Secondo gli autori, il risultato potrà essere sfruttato per studiare con maggiore dettaglio anche altri fenomeni di fisica delle particelle.

Matteo Serra

Cortesia ESA/P. Carril

ASTRONOMIA

Acqua lunare dal vento solare?

L'impatto di protoni con la regolite lunare può produrre gruppi idrossile

Il Sole emette un flusso incessante di particelle cariche che pervade tutto il nostro sistema planetario. Questo flusso, noto come vento solare, è composto principalmente da protoni, ovvero da nuclei di idrogeno, che interagiscono con le atmosfere o le superfici dei corpi celesti che incontrano lungo il loro viaggio.

Sul nostro pianeta l'azione combinata del campo geomagnetico e dell'atmosfera terrestre sul vento solare è all'origine delle aurore polari. Tutt'altro effetto avviene invece sulla Luna, dove il tenue strato di gas che la avvolge, detto esosfera, non impedisce ai protoni del vento solare, che arrivano a quella distanza dal Sole con una velocità di 450 chilometri al secondo, di colpire la superficie. Gli effetti di questi impatti sono stati studiati da un gruppo guidato da Orenthal James Tucker, del NASA Goddard Space Flight Center di Greenbelt, negli Stati Uniti, che ha pubblicato i risultati sul «Journal of Geophysical Research: Planets».

La superficie lunare è avvolta da un manto di regolite, composta principalmente da silice (diossido di silicio, SiO_2). La silice, colpita dai protoni del vento solare, può spezzarsi liberando atomi di ossigeno che a loro volta possono combinarsi con atomi di idrogeno, anch'essi frutto dell'interazione fra i protoni del vento solare e gli elettroni delle molecole che compongono la regolite. Il risultato è la produzione di gruppi idrossile (OH), alla base della molecola d'acqua. Secondo Tucker e colleghi, questo meccanismo di formazione di gruppi idrossile, grazie all'azione del vento solare sulle molecole portatrici di ossigeno che compongono la regolite, potrebbe essere efficace anche sulle superfici rocciose di molti altri corpi del nostro sistema planetario. Resta tuttavia da spiegare se e come possa verificarsi il passaggio successivo: la formazione di acqua.

Emiliano Ricci

Il primo «liquido di elettroni» a temperatura ambiente

Un gruppo di fisici dell'Università della California a Riverside ha scoperto un nuovo stato della materia che promette applicazioni molto interessanti: si tratta di un vero e proprio «liquido elettronico», osservato per la prima volta a temperatura ambiente. La scoperta, pubblicata su «Nature Photonics», apre la strada allo sviluppo di dispositivi utili per le comunicazioni spaziali, ma anche per individuare cellule tumorali.
I ricercatori, guidati da Nathaniel Gabor, hanno bombardato un materiale semiconduttore estremamente sottile (di spessore solo leggermente superiore a quello di una singola molecola di DNA) con un potente fascio laser. In esperimenti di questo tipo il laser eccita gli atomi del materiale liberando elettroni e lasciando delle «buche» cariche positivamente: tipicamente elettroni e buche poi si diffondono nel materiale in modo simile alle molecole di un gas.
In questa occasione, però, gli scienziati hanno osservato che aumentando in modo significativo l'energia del laser si ha una sorta di «condensazione» della corrente formata da elettroni e buche, che si muove in modo molto simile a un liquido.
L'aspetto notevole, come sottolineato da Gabor e colleghi, è che questo comportamento è stato osservato a temperatura ambiente, mentre in passato era stato rilevato solo a temperature estremamente basse.
Le proprietà particolari del liquido elettronico lo rendono potenzialmente utile per lo sviluppo di dispositivi che operino in una specifica regione dello spettro elettromagnetico, compresa tra le microonde e i raggi infrarossi, le cui frequenze sono dell'ordine dei terahertz (10^{12} hertz). Secondo i ricercatori, questi dispositivi - in grado di trasmettere e ricevere onde a queste frequenze - potrebbero individuare tumori della pelle e addirittura armi nascoste sotto i vestiti, e potrebbero essere sfruttati per le comunicazioni nello spazio e nella produzione di computer quantistici molto più piccoli di quelli classici di oggi basati sulla tecnologia al silicio.

Matteo Serra

M. Claro/SPL/AGF

BIOINGEGNERIA

Protesi robotiche made in Italy

Successo per mani protesiche sviluppate grazie a importanti contributi italiani

Tra i risultati più eclatanti raggiunti dai bioingegneri italiani spicca l'impianto permanente realizzato di recente per una paziente svedese nell'ambito del progetto internazionale DeTop, coordinato dalla Scuola superiore Sant'Anna di Pisa e a cui partecipano Università Campus Bio-Medico di Roma, Centro Protesi INAIL di Budrio, vicino a Bologna, e Servizio sanitario regionale dell'Emilia-Romagna.

Al progetto partecipano anche le svedesi Università di Göteborg e Università di Lund, la britannica Università dell'Essex e Integrum, azienda svedese che ha sviluppato le connessioni della protesi alle fibre muscolari e nervose. Questi contatti confluiscono in una sorta di innesto collocato su un impianto in titanio a sua volta inserito nelle ossa dell'avambraccio. La mano protesica, chiamata Mia e sviluppata da Prensilia, *spin-off* della scuola pisana, si inserisce nell'innesto e, spiega il coordinatore del progetto Christian Cipriani, dell'Istituto di biorobotica della Scuola superiore Sant'Anna di Pisa, riceve «gli stimoli neuromuscolari che permettono di muovere le dita e il polso in modo naturale, proprio come facciamo quando controlliamo una mano sana».

Un obiettivo del progetto DeTop è restituire in pieno anche il senso del tatto. Uno studio pubblicato di recente su «Science Robotics», ed effettuato da ricercatori di Università Campus Bio-Medico di Roma, Università di Padova, Centro Protesi INAIL di Budrio e Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik di Sulzbach, in Germania, ha segnato un passo ulteriore in questa direzione.

Per 11 settimane in una paziente sono stati impiantati elettrodi inseriti nelle fibre nervose della parte sana del braccio; in questo modo è stato possibile ripristinare, oltre alla capacità di «sentire» un oggetto impugnato, anche la tipica sensazione di scivolamento che si ha quando la presa non è sufficientemente salda. Studi di questo tipo aiutano a migliorare le prestazioni delle protesi robotiche, sempre più vicine a quelle di una mano vera.

Riccardo Oldani

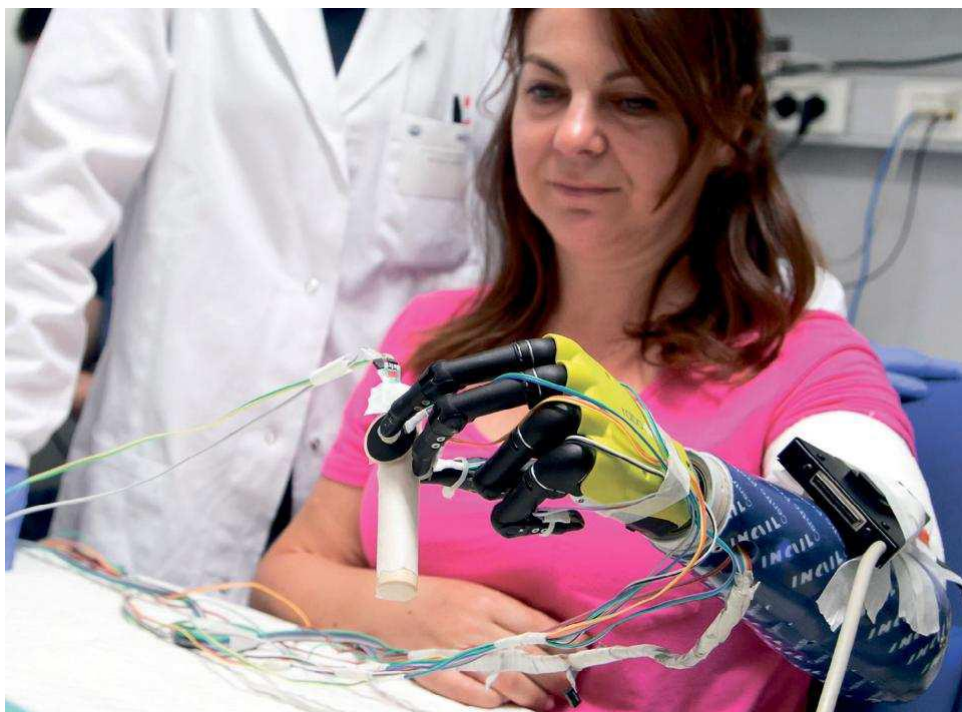
Naturalmente OGM: le graminacee rubano geni per adattarsi

Sebbene il trasferimento genico orizzontale, cioè lo scambio di materiale genetico tra cellule non strettamente imparentate, sia molto diffuso tra i batteri, la sua frequenza negli organismi pluricellulari rimane controversa. Come sono controversi anche il significato e l'importanza di questa scorciatoia evolutiva per tutte le specie che hanno sposato la riproduzione sessuata. Uno studio coordinato dal botanico Luke Dunning dell'Università di Sheffield, in Regno Unito, e pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», dimostra che questo avviene regolarmente, almeno tra le piante della famiglia delle graminacee.

Impegnati nello studio di *Alloteropsis semialata*, tipica degli ambienti tropicali e subtropicali, i ricercatori hanno sequenziato il genoma di un esemplare raccolto in Australia per confrontarlo con quello di altre 146 graminacee, tra cui riso, mais, orzo, canna da zucchero e bambù. Le analisi hanno evidenziato l'esistenza di 26 sequenze di DNA di origine estranea disposte su ben 23 diversi frammenti, per un totale di 59 geni estranei. Nonostante i numerosi riarrangiamenti cromosomici avvenuti nel tempo, gli autori sono riusciti a individuare il contributo di almeno nove specie donatrici, ciascuna delle quali ha un trascorso evolutivo indipendente da *A. semialata* di alcune decine di milioni di anni. Un secondo confronto, effettuato tra il genoma dell'esemplare di riferimento e campioni rappresentativi delle 24 popolazioni che formano la specie *A. semialata*, ha permesso di risalire al momento e al luogo di questi trasferimenti. L'acquisizione di caratteri vantaggiosi, come la resistenza a malattie e stress ambientali, tramite alcuni dei geni isolati, spinge i ricercatori verso una spiegazione adattativa. E a rimettere in discussione il concetto di organismo geneticamente modificato: quanto osservato in *A. semialata* non è poi così diverso dall'ingegneria genetica.

Davide Michielin

Alain Kubacsi/ agefotostock/AGF

Cortesia Zollo e altri, in «Science Robotics», Vol. 4, eaau9924, 2019 (*paziente con protesi robotica*); alvarez/iStock (*farmaci*)

Il metabolismo dei farmaci secondo i batteri

Che un farmaco abbia effetti diversi da persona a persona non dipende solo dai geni ma anche, e non poco, dai microbi dell'intestino. La cosa in sé non stupisce, poiché i batteri intestinali metabolizzano pressoché tutto ciò che ingeriamo, farmaci inclusi. Ma distinguere il loro contributo è complicato. Andrew Goodman, della Yale University, ci è riuscito somministrando la brivudina a topi dai microbiomi manipolati in vari modi, e misurando poi come cambiavano i livelli del farmaco e di un suo metabolita (tossico per il fegato se in eccesso). La brivudina si usa contro l'herpes e appartiene agli analoghi dei nucleosidi, una classe di farmaci antivirali e antidepressivi.
La conversione nel metabolita, riferisce Goodman su «Science», è anche opera dei microbi, tant'è che i topi senza batteri intestinali ne producono meno. Individuato un gene batterico responsabile della conversione, Goodman ha creato topi identici per genoma proprio e dei batteri intestinali, eccetto che per questo gene. Ha così costruito un modello del contributo batterico al metabolismo del farmaco in diverse condizioni, variando per esempio il transito e l'assorbimento intestinale, e ha mostrato che i microbi spiegano fino al 70 per cento del suo metabolismo complessivo.
Il modello ha previsto con accuratezza l'accumulo di farmaco e metabolita nel sangue in condizioni diverse, e si è mostrato adattabile ad altri farmaci

della stessa classe. Per verificare la generalizzabilità del metodo, Goodman lo ha inoltre applicato per creare un modello analogo per un farmaco diverso, la benzodiazepina clonazepam, soggetta a molteplici vie metaboliche.
«La nostra strategia sperimentale e computazionale permette di distinguere i contributi dell'ospite e dei batteri, e potrà aiutare a realizzare strategie su misura per migliorare le risposte ai farmaci», ha concluso Goodman.

Giovanni Sabato

Quel gusto per il grasso che ci ha reso umani

Altro che carne. Ad alimentare, letteralmente, l'ascesa del genere *Homo* è stato il grasso. Prima del fuoco, degli strumenti affilati per tagliare le carni, della caccia in gruppo, i nostri lontani antenati *Australopithecus* che vagavano in Africa quattro milioni di anni fa mangiavano il midollo contenuto nelle ossa delle carcasse di animali uccisi da predatori più abili di loro. L'ipotesi, formulata in base a modelli teorici, record archeologici ed ecologia degli scimpanzé, è opera dell'antropologa Jessica Thompson della Yale University e colleghi. Rispetto alla carne magra degli animali selvatici, spiega lo studio su «Current Biology», il midollo, estratto frantumando le ossa con semplici pietre, avrebbe fornito più energia per sostenere il metabolismo di un cervello in espansione, già del 30 per cento più voluminoso di quello di uno scimpanzé di taglia simile, che con la successiva comparsa del genere *Homo* avrebbe triplicato il volume di partenza di *Australopithecus*.
«La riserva di grasso nelle ossa delle carcasse forniva un enorme apporto di calorie in un ambiente povero di risorse – ha spiegato Thompson – offrendo a popolazioni ancestrali il vantaggio necessario per dare il via all'evoluzione umana.»

Martina Saporiti

Quando la vita ha iniziato a muoversi strisciando

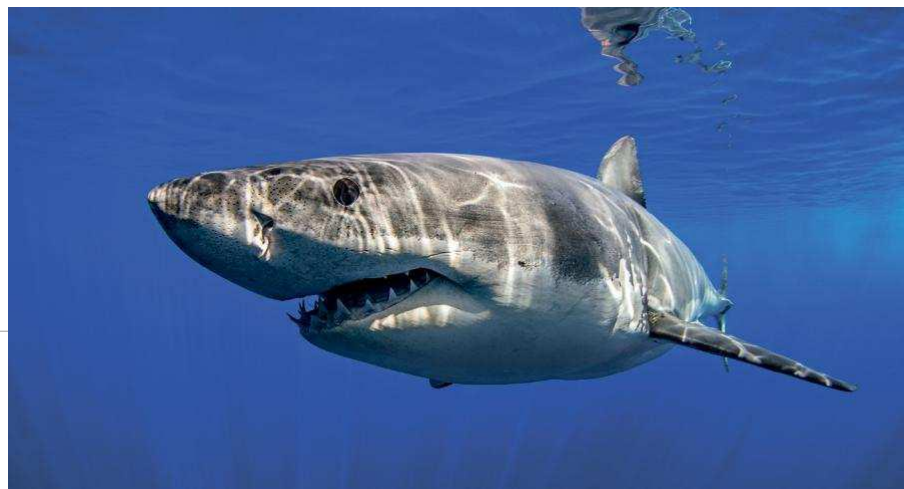
Provengono dal Gabon, in Africa centrale, le più antiche testimonianze fossili di organismi capaci di muoversi, risalenti a oltre due miliardi di anni fa. Le ha scoperte nel bacino di Franceville un gruppo internazionale di scienziati coordinato da Abderrazak El Albani dell'Università di Poitiers, in Francia.
Prima di questa scoperta le tracce più antiche erano associate alla cosiddetta fauna di Ediacara, di 600 milioni di anni fa. Le nuove tracce, descritte sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», risalgono invece a 2,1 miliardi di anni fa e provengono dallo stesso giacimento in cui nel 2014 sono stati scoperti i più antichi resti fossili attribuibili a organismi pluricellulari.
Le tracce scoperte in Gabon quindi anticiperebbero la comparsa della motilità di ben 1,5 miliardi di anni.
El Albani e colleghi le hanno analizzate e ricostruite in 3D sfruttando una tecnica di imaging non distruttiva.
Le tracce appaiono come strutture tubolari riempite di pirite, minerale composto da zolfo e ferro, più o meno sinuose, con diametro di circa sei millimetri e lunghe al massimo 17 centimetri.
Sarebbero state lasciate da un misterioso organismo strisciante, forse simile a un'ameba coloniale di oggi, che si spostava in cerca di cibo e di ossigeno nel fango di un fondale marino basso e calmo. (*EuMe*)

Meno ghiaccio al Polo Nord, inverni più freddi in Eurasia

Perché in un regime di riscaldamento globale si sono verificate tante irruzioni fredde alle medie latitudini negli ultimi anni? Alcuni indizi puntano alla diminuzione della superficie ghiacciata nel Circolo polare artico, che non permetterebbe più all'aria fredda di rimanere costantemente confinata a quelle latitudini. Ora una ricerca di Masato Mori dell'Università di Tokyo e colleghi, pubblicata di recente su «Nature Climate Change», ha analizzato osservazioni e andamenti di sette modelli climatici, chiarendo la situazione.

I modelli «vedono» tutti un'influenza della perdita di ghiaccio artico sugli eventi di discesa di correnti fredde sul continente Euroasiatico, tuttavia mostrano intensità differenti di questo influsso. Analizzando i comportamenti modellistici, anche alla luce delle osservazioni, Mori e collaboratori hanno stimato che il 44 per cento del raffreddamento invernale tra il 1995 e il 2014, almeno sulla parte centrale del continente Euroasiatico, è attribuibile alla perdita di ghiacci nella zona dei mari di Barents e di Kara. Dato che questa fusione dei ghiacci è principalmente causata dal riscaldamento globale alimentato dalle attività umane, anche questi inverni freddi sono in parte dovuti ai nostri influssi sul clima della Terra. (*AnPa*)

Sequenziato il genoma del grande squalo bianco

I segreti del più iconico dei predatori marini, il grande squalo bianco (*Carcharodon carcharias*), saranno presto svelati. Grazie al lavoro di un gruppo di ricerca internazionale diretto da Mahmood S. Shivji della Nova Southeastern University, in Florida, è stato completato il sequenziamento del genoma di questo predatore marino, come annunciato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», e già da questo traguardo sono emerse le prime interessanti scoperte.
In particolare, gli scienziati hanno osservato che oltre la metà delle 4,63 miliardi di coppie di basi del genoma di *C. carcharias* – come termine di paragone si consideri che quello umano ha 3,2 miliardi di coppie di basi – è costituita da sequenze ripetute, con una consistente presenza di trasposoni, cioè elementi genetici mobili, che potrebbero spiegare il successo evolutivo dell'animale. Inoltre, sono state identificate specifiche successioni di mutamenti in geni dal ruolo fondamentale nel mantenimento della stabilità del genoma e nelle funzioni di riparazione del DNA. Questa scoperta è importante poiché proprio il progressivo danneggiamento dei geni è uno dei meccanismi alla base delle degenerazioni cellulari neoplastiche. (*MaSe*)

poludziber/iStock (*neve a Roma*); Ken Kiefer 2/ ImageSource/AGF (*grande squalo bianco*)

La costante della massima biodiversità possibile

Tra i paleontologi è piuttosto diffusa la convinzione che, nel corso del tempo geologico, la biodiversità della Terra abbia sperimentato un crescendo continuo. Tuttavia, questa convinzione rimane difficile sia da dimostrare sia da smentire poiché più si va indietro nel tempo, più la documentazione fossile è scarsa e incompleta.

Uno studio imponente, coordinato dal paleobiologo Roger Close dell'Università di Birmingham, in Regno Unito, e pubblicato su «Nature Ecology & Evolution», offre nuovi spunti di riflessione. Grazie a speciali algoritmi, i ricercatori hanno analizzato buona parte dei fossili di vertebrati terrestri scoperti negli ultimi 200 anni in oltre 30.000 siti, fino a coprire un intervallo di 400 milioni di anni. I risultati suggeriscono che, nel tempo geologico considerato, il numero medio di specie sia aumentato solo sporadicamente. In effetti, ai ripidi picchi di biodiversità che seguono i grandi sconvolgimenti ecologici, si contrappongono lunghi *plateau* della durata di decine di milioni di anni, durante i quali il numero di specie rimane pressoché costante. Secondo gli autori, questo dimostra che la competizione per le risorse limita il numero complessivo di specie che possono coesistere, anche a livello globale. (*DaMi*)

Topi che vedono nell'infrarosso vicino

La componente infrarossa dello spettro elettromagnetico è invisibile ai mammiferi, perché i loro fotorecettori (le cellule dell'occhio che catturano la luce) ricevono solo le lunghezze d'onda comprese fra i 400 e i 700 nanometri. Ma, come ha dimostrato su «Cell» un gruppo di scienziati, è possibile usare particelle dalla forma di una sfera, grandi un milionesimo di un granello di sabbia e composte da metalli rari, per ottenere topi che vedono oltre lo spettro del visibile, cioè nel vicino infrarosso.

Se iniettate direttamente nell'occhio, le nanoparticelle «traducono» la radiazione infrarossa nella lunghezza d'onda corrispondente alla luce verde, permettendo di inviare al cervello un'informazione altrimenti inesistente. Infatti, a differenza di topi di controllo, cioè con fotorecettori non modificati, che percepivano solo le radiazioni nello spettro della luce visibile, i topi studiati da Jin Bao e colleghi all'Università della Scienza e della Tecnologia della Cina reagivano anche a radiazioni di 980 nanometri, ovvero nell'infrarosso vicino: le loro pupille si contraevano, la corteccia visiva si attivava e gli animali collocati in ambienti illuminati con lampada a infrarossi tendevano a preferire il buio, una reazione innata alla luce. (*SaMo*)

Tre grandi tsunami medievali causati dallo Stromboli

Novembre 1343, il poeta toscano Francesco Petrarca è a Napoli e assiste a un maremoto: «Si vedevano sparsi per le acque infiniti poveri, che la violenza del mare haveva con tanta furia buttati nel porto», scrive al Papa. Il mistero delle cause di quello tsunami, e di altri due verificatisi in Campania nel 1392 e nel 1456, è stato svelato ora da ricercatori dell'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGVI) su «Scientific Reports»: il responsabile è il vulcano Stromboli, nelle isole Eolie. «L'identificazione è stata possibile unendo competenze vulcanologiche e archeologiche», spiega Antonella Bertagnini, vulcanologa dell'INGV di Pisa, autrice dello studio. «Le prime avevano già dimostrato che l'isola è capace di produrre maremoti, con il franare in mare delle sue pareti. Le seconde avevano rivelato che Stromboli fu abbandonata fra la metà del XIV secolo e il 1600.» Il quel periodo un'attività vulcanica molto più intensa dell'attuale sovraccaricò la parete nord ovest dell'isola di così tanti detriti da causare i tre eventi campani e la fuga della popolazione locale per il susseguirsi di eruzioni, frane e maremoti. (*AlSa*)

luiginifosi/iStock

Misurare la gravità di oggetti leggerissimi

Fin dai tempi degli esperimenti pionieristici degli scienziati britannici Nevil Maskelyne ed Henry Cavendish, effettuati alla fine del Settecento, misurare con precisione l'attrazione gravitazionale tra due corpi è sempre stata una sfida tecnicamente non banale per i fisici. Soprattutto quando le masse in gioco sono piccole, tanto che fino a oggi la forza di gravità non è mai stata misurata con oggetti più leggeri di 90 grammi. Ora però un gruppo di ricerca guidato da Nobuyuki Matsumoto della giapponese Tohoku University di Sendai ha presentato su «Physical Review Letters» un metodo che permette di misurare la gravità di oggetti ben più leggeri, dell'ordine dei 100 milligrammi.

Il sistema ideato dai ricercatori giapponese consiste in una cavità ottica composta di tre specchi, di cui uno mobile. La gravità di un oggetto lasciato libero di oscillare vicino alla cavità ha l'effetto di trascinare lo specchio mobile: tracciando il moto di quest'ultimo è quindi possibile risalire al valore della forza gravitazionale. Secondo Matsumoto e colleghi, la sensibilità dello strumento potrebbe essere potenziata fino a misurare la gravità di oggetti di dimensioni quantistiche, offrendo quindi l'opportunità di indagare la natura quantistica della forza gravità. (*MaSe*)

IN BREVE

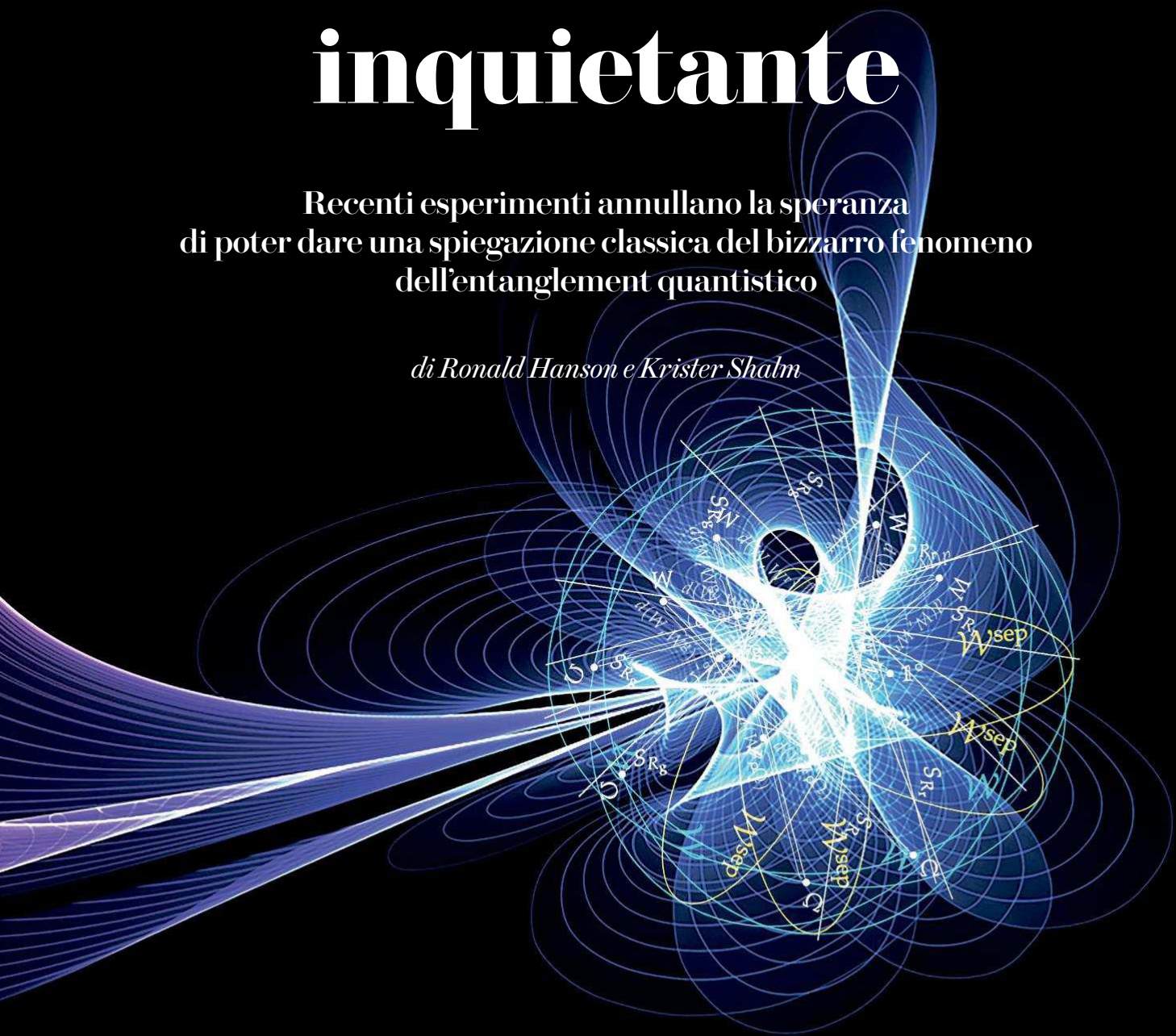
Nel 1964 il fisico John Bell scoprì che il fenomeno dell'entanglement quantistico – in cui due particelle possono mantenere una «inquietante» connessione anche quando sono distanti – porta a un conflitto matematico con la nostra immagine intuitiva della natura.

Dai tempi della proposta di Bell sono state allestite sperimentalmente molte versioni del suo test. La maggior parte dei risultati sembrava in accordo con l'esistenza dell'entanglement, ma in ognuno c'era qualche scappatoia che rendeva possibile l'azione di «variabili nascoste» dietro le quinte, con la produzione di risultati solo apparentemente dovuti all'entanglement.

Infine, nel 2015 diversi gruppi hanno effettuato i primi test di Bell privi di scappatoie, escludendo qualsiasi spiegazione basata su variabili nascoste locali.

Azione inquietante

Recenti esperimenti annullano la speranza di poter dare una spiegazione classica del bizzarro fenomeno dell'entanglement quantistico

di Ronald Hanson e Krister Shalm

Non tutte le rivoluzioni iniziano in grande. Nel caso della meccanica quantistica, nel 1964 ne iniziò una tranquilla, quando il fisico John Bell pubblicò un'equazione: sotto forma di disuguaglianza matematica, proponeva un criterio per affrontare le profonde questioni filosofiche che avevano turbato molti dei primi fondatori della meccanica quantistica. Il problema era se fosse possibile che particelle separate da grandi distanze potessero mantenere un collegamento tale che le misurazioni effettuate su una influenzassero l'altra. Secondo la fisica classica, doveva essere impossibile. Ma all'interno della teoria quantistica accade di continuo. Con la sua equazione, Bell proponeva un modo per determinare se l'universo potesse davvero essere così strano.

Nell'ultimo mezzo secolo la sua semplice equazione ha profondamente cambiato il modo in cui pensiamo alla meccanica quantistica. Oggi molte tecnologie quantistiche inventate dai fisici devono le loro origini al test di Bell, ma solo nel 2015, più di cinquant'anni dopo che Bell ebbe proposto la sua disuguaglianza, si è riusciti a verificare le previsioni di quel teorema nel modo più completo possibile. Questi esperimenti coronano un'impresa che ha attraversato generazioni e segnano l'inizio di una nuova era nello sviluppo di tecnologie quantistiche.

Variabili nascoste

Per capire l'equazione di Bell dobbiamo tornare alle radici della meccanica quantistica, un insieme di regole che descrive il comportamento di luce e materia alla scala minima. Atomi, elettroni, fotoni e altre particelle subatomiche si comportano diversamente da quello che osserviamo nella vita quotidiana. Una delle principali differenze è che queste minuscole particelle si trovano in stati indeterminati. Consideriamo lo spin dell'elettrone. Se un elettrone il cui spin è diretto lateralmente attraversa un campo magnetico orientato verso l'alto e il basso, metà delle volte si girerà in su e l'altra metà in giù, ma il risultato è autenticamente casuale. Confrontiamolo con il lancio di una moneta: potremmo pensare che sia altrettanto casuale, ma se conoscessimo esattamente la massa della moneta, quanta forza è usata per farla ruotare e tutti i dettagli sulle correnti d'aria che la colpiscono, saremmo in grado di prevedere esattamente il modo in cui atterra. Lo spin dell'elettrone è completamente diverso; anche se avessimo una conoscenza perfetta di tutte le proprietà dell'elettrone e del suo spin prima del passaggio attraverso il campo magnetico, l'indeterminazione quantistica ci impedirebbe di sapere in che direzione sarà rivolto (ma possiamo calcolare la probabilità che punti verso l'alto o il basso). Quando gli scienziati misurano materialmente un certo sistema quantistico, però, tutte queste possibilità cessano in qualche modo di esistere e viene fissato un singolo risultato: l'elettrone si ritrova con uno spin che è orientato verso l'alto o verso il basso.

Quando all'inizio del XX secolo fu formulata la meccanica quantistica, alcuni suoi fondatori come Albert Einstein ed Erwin Schrödinger provarono un certo disagio nei confronti della vaghezza degli stati quantici. Forse, pensavano, la natura non è davvero indeterminata, e una teoria che vada oltre la meccanica quantistica potrebbe prevedere con esattezza il comportamento delle particelle. Sarebbe così possibile prevedere l'esito di una misurazione dello spin di un elettrone allo stesso modo in cui è possibile sapere esattamente come atterrerà una moneta se si dispone di informazioni sufficienti.

Schrödinger introdusse l'idea di *entanglement* per descrivere l'incertezza quantica distribuita su due o più particelle. Secondo la teoria quantistica, le proprietà delle particelle possono trovarsi in entanglement in modo che il loro valore congiunto è noto con precisione, ma i valori individuali rimangono incerti. Un'analogia sarebbe costituita da due dadi che, una volta lanciati, diano ognuno un risultato casuale ma la cui somma sia sempre 7. Schrödinger usò l'idea dell'entanglement in un famoso esperimento mentale in cui l'indeterminazione dello stato di un atomo è in entanglement (è *entangled*) con l'essere vivo o morto di un gatto. Ovviamente qualsiasi gatto è vivo o morto, non in un assurdo limbo intermedio, ragionò Schrödinger, quindi dovremmo mettere in discussione l'intera idea che gli atomi possano trovarsi in stati indeterminati.

Ronald Hanson è un fisico del Politecnico di Delft, nei Paesi Bassi, e direttore scientifico del centro di ricerca QuTech, una collaborazione con l'Organizzazione olandese per la ricerca scientifica applicata (TNO) centrata sul calcolo quantistico e sulla tecnologia dell'Internet quantistica.

Krister Shalm è un fisico al National Institute of Standards and Technology e all'Università del Colorado a Boulder, negli Stati Uniti, dove sviluppa strumenti per testare i problemi fondamentali della meccanica quantistica.

Insieme ai suoi collaboratori Boris Podolsky e Nathan Rosen (noti congiuntamente come EPR), Einstein portò avanti il ragionamento analizzando due elettroni molto distanti tra loro che siano in entanglement. Immaginiamo che gli spin di queste particelle siano collegati in modo che, se li si misura lungo la stessa direzione, risultino sempre valori opposti. Per esempio, se gli scienziati misurano lo spin di uno degli elettroni e lo trovano rivolto verso l'alto, l'altro punterà verso il basso. Queste correlazioni sono particolarmente sorprendenti quando gli elettroni sono tanto distanti tra loro che non potrebbero comunicare nemmeno alla velocità della luce prima che i singoli spin vengano misurati. Come fa la seconda particella a sapere che la prima era rivolta verso l'alto? Einstein definì questa sincronizzazione «inquietante azione a distanza».

L'analisi di EPR di questo caso, pubblicata nel 1935 in un lavoro ormai classico, partiva da due presupposti molto ragionevoli.

Nell'ultimo mezzo secolo la semplice equazione di Bell ha profondamente cambiato il modo in cui pensiamo alla meccanica quantistica

Primo, se è possibile prevedere con certezza il risultato di una misurazione, ci deve essere una proprietà in natura che corrisponda a questo risultato; Einstein chiamava queste proprietà «elementi della realtà». Per esempio, se sappiamo che lo spin di un elettrone è verso l'alto, possiamo prevedere con certezza che se si muove attraverso un opportuno campo magnetico sarà sempre deviato verso l'alto. In questa situazione, lo spin dell'elettrone sarebbe un elemento della realtà perché è ben definito e non indeterminato. Secondo, un evento in un luogo non può influenzare istantaneamente un evento lontano; le influenze non possono viaggiare a velocità maggiore di quella della luce.

Partendo da questi presupposti, analizziamo due elettroni in entanglement tenuti in luoghi distanti da due persone: Alice e Bob. Supponiamo che Alice misuri lo spin del suo elettrone lungo la direzione z. A causa della perfetta anticorrelazione, Alice sa subito quale sarà il risultato se anche Bob misurerà lo spin del suo elettrone lungo z. Secondo EPR, la componente z dell'elettrone di Bob sarebbe quindi un elemento della realtà. Allo stesso modo, se Alice decide di misurare lo spin lungo x, conoscerà con certezza il risultato di una misurazione dello spin dell'elettrone di Bob lungo x. In questo caso sarebbe la componente x dello spin dell'elettrone di Bob a essere un elemento della realtà. Ma dato che Alice e Bob sono molto distanti, la decisione di Alice di misurare lungo la direzio-

Illustrazione di Kenn Brown e Chris Wren, Mondolithic Studios (*pagine precedenti*)

ne z o la direzione x non può influenzare quello che accade dalla parte di Bob. Quindi, per spiegare le perfette anticorrelazioni previste dalla teoria quantistica, il valore dello spin dell'elettrone di Bob deve essere perfettamente prevedibile sia lungo la direzione z che lungo la x. Questo sembra contraddire la meccanica quantistica, che afferma, tramite il principio di indeterminazione di Heisenberg, che lo spin può avere un valore ben definito lungo un'unica direzione e deve essere incerto lungo le altre.

Questo conflitto portò EPR a concludere che la teoria quantistica fosse incompleta; ipotizzarono che si potesse risolvere la contraddizione completando la teoria con variabili aggiuntive. Potrebbe esserci una teoria più profonda che va oltre la meccanica quantistica e in cui gli elettroni hanno proprietà addizionali che descrivono come si comportano quando sono misurati congiuntamente. Queste variabili extra potrebbero essere celate, ma se riuscissimo ad accedervi potremmo prevedere esattamente che cosa accadrebbe agli elettroni: l'apparente indeterminazione delle particelle quantistiche è dovuta alla nostra ignoranza. I fisici chiamano ogni successore della meccanica quantistica con questo tipo di variabili nascoste una «teoria a variabili nascoste locali». L'aggettivo «locale» si riferisce al fatto che i segnali nascosti non potrebbero viaggiare a velocità maggiore della luce.

La trovata di Bell

Einstein non metteva in discussione le previsioni della meccanica quantistica; credeva però che esistesse una verità più profonda, sotto forma di variabili nascoste che governano la realtà. Dopo l'articolo EPR del 1935 l'interesse per questi aspetti fondazionali della meccanica quantistica venne meno. La possibile esistenza delle variabili nascoste era vista come una questione filosofica senza alcun valore pratico: le previsioni formulate da teorie con e senza variabili nascoste sembravano identiche. Ma nel 1964 cambiò tutto, quando Bell mostrò sorprendentemente che in certe circostanze le teorie con variabili nascoste e i meccanismi quantistici prevedevano cose diverse. Questa rivelazione implicava la possibilità di verificare sperimentalmente se le teorie a variabili nascoste locali – e quindi la verità fisica più profonda in cui sperava Einstein – possano realmente esistere.

Einstein non metteva in discussione le previsioni della teoria dei quanti, credeva che esistesse una verità più profonda

Bell analizzò l'esperimento mentale di EPR, ma con una differenza: permise ad Alice e Bob di misurare gli spin dei loro elettroni lungo ogni direzione possibile. Nell'esperimento tradizionale Alice e Bob devono fare le misurazioni lungo la stessa direzione, e così scoprire che i loro risultati sono correlati al 100 per cento: se Alice ottiene «su», allora Bob ottiene sempre «giù». Ma se a volte Alice e Bob misurano lungo assi diversi, in certi casi i loro risultati non sono sincronizzati, ed è qui che entrano in gioco le differenze tra teoria quantistica e teorie a variabili nascoste. Bell mostrò che per certi insiemi di direzioni le correlazioni tra i risultati delle misurazioni di Alice e di Bob sarebbero più elevate secondo la teoria quantistica che secondo qualsiasi teoria a variabili nascoste locali, una differenza nota come disuguaglianza di Bell. Queste differenze emergono perché le variabili nascoste non possono influenzarsi a vicenda a velocità maggiore di quella luce, quindi la misura in cui possono coordinare i loro sforzi è limitata. La meccanica quantistica, invece, permette agli spin di due elettroni di esistere congiuntamente in un unico stato indeterminato in entanglement che può estendersi su distanze enormi. L'entanglement fa sì che la teoria quantistica preveda correlazioni che sono fino al 40 per cento più elevate.

Il teorema di Bell ha completamente cambiato il modo di pensare dei fisici. Ha evidenziato un conflitto matematico tra la visione di Einstein e la teoria quantistica e ha descritto un modo efficace per testare sperimentalmente le due possibilità. Poiché il teorema è una disuguaglianza matematica che limita l'entità delle possibili correlazioni presenti in un teoria a variabili nascoste locali, dati sperimentali che superano questi limiti – in altre parole, che «violano» la disuguaglianza di Bell – mostrerebbero che le teorie a variabili nascoste locali non possono descrivere la natura.

Poco dopo la pubblicazione di Bell i fisici John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony e Richard Holt (noti insieme come CHSH) trovarono disuguaglianze simili che erano più facili da verificare sperimentalmente. I primi esperimenti si sono svolti alla fine degli anni sessanta e da allora si sono avvicinati sempre più all'allestimento ideale proposto da Bell. Hanno riscontrato correlazioni che violano la disuguaglianza di Bell e apparentemente non si possono spiegare con le teorie a variabili nascoste locali. Fino al 2015, però, tutti gli esperimenti si basavano necessariamente su una o più ipotesi aggiuntive, a causa di imperfezioni nell'allestimento. In quelle ipotesi rimaneva la possibilità che le teorie a variabili nascoste locali potessero in linea di principio superare il test.

In quasi tutti gli esperimenti di questo tipo condotti nel XX secolo venivano generati fotoni posti in entanglement all'origine e poi inviati alle stazioni di misurazione (che svolgono il ruolo di Alice e Bob). Le stazioni Alice e Bob misuravano ciascuna il rispettivo fotone lungo uno dei due orientamenti, osservandone la polarizzazione, cioè la direzione in cui oscilla il campo elettrico del fotone (la polarizzazione si può pensare come l'analogo dello spin per un fotone). Poi venivano calcolate le correlazioni medie tra i risultati delle due stazioni e infine le correlazioni medie erano inserite nell'equazione di Bell per verificare se i risultati violavano la disuguaglianza.

Esperimenti con riserve

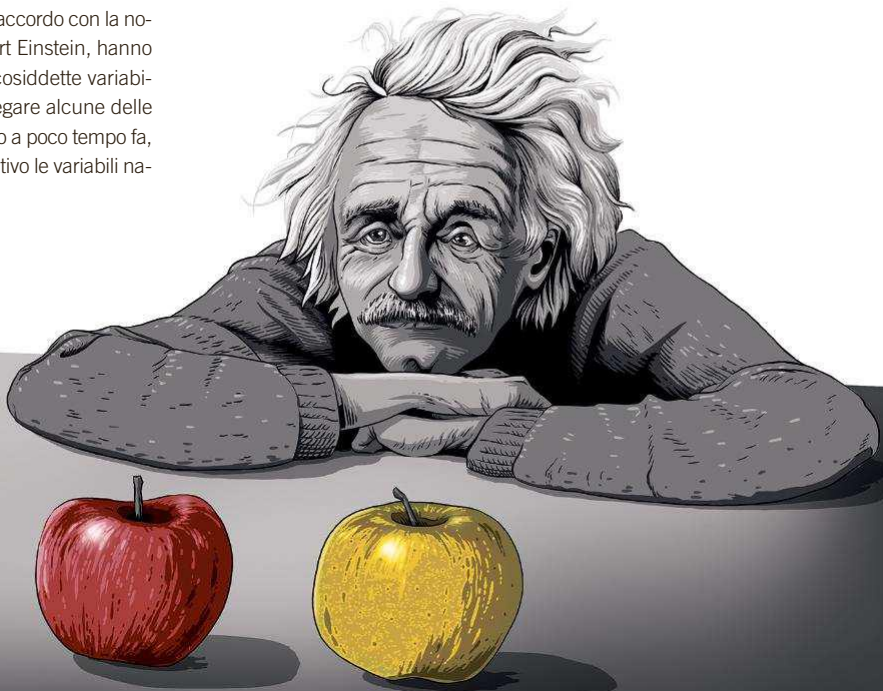
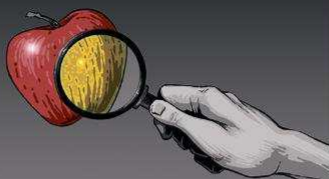
Nella prima serie di esperimenti si usavano direzioni di misurazione fisse. In questi casi le variabili nascoste hanno tutto il tempo (usando la conoscenza delle direzioni di misurazione su entrambi i lati) per influenzare i risultati: possono esserci segnali nascosti che, senza viaggiare più veloci della luce, dicono a Bob in quale direzione Alice abbia misurato il suo fotone. Questa cosiddetta scappatoia (*loophole*) della località fa sì che una teoria a variabili nascoste possa spiegare le correlazioni quantistiche. Nel 1982 il fisico francese Alain Aspect e i suoi collaboratori hanno condotto un esperimento in cui venivano inviati fotoni alle estremità opposte di un ambiente spazioso e veniva misurata la loro polarizzazione. Mentre questi fotoni entangled erano in volo, l'angolo di polarizzazione del dispositivo di misurazione cambiava periodicamente.

Alla fine degli anni novanta Anton Zeilinger, ora all'Università di Vienna, e i suoi colleghi hanno migliorato ulteriormente questa strategia usando direzioni di misurazione della polarizzazione veramente casuali (e non periodiche). Inoltre, queste direzioni erano

Chiudere tutte le scappatoie

La meccanica quantistica propone un universo in disaccordo con la nostra realtà intuitiva. Alcuni scienziati, tra i quali Albert Einstein, hanno sperato che teorie alternative, in cui compaiono le cosiddette variabili nascoste in azione dietro le quinte, potessero spiegare alcune delle più bizzarre conseguenze della teoria quantistica. Fino a poco tempo fa, nessun esperimento poteva escludere in modo definitivo le variabili nascoste locali, ma nel 2015 le cose sono cambiate.

Le obiezioni di Einstein alla meccanica quantistica si basavano su due principi fondamentali: **realismo** e **località**.

Il realismo è il concetto che gli oggetti hanno proprietà ben precise: una mela, per esempio, o è rossa o è gialla.
La località è l'idea che gli oggetti possano essere influenzati solo dall'ambiente circostante; le influenze non possono viaggiare più velocemente della luce.

Invece la meccanica quantistica suggerisce che la realtà sia ben più strana.

Secondo la meccanica quantistica una particella può trovarsi in due stati allo stesso tempo.

Per esempio, una mela quantistica...

... può non essere *rossa*...

... né *gialla* ma...

... una *sovrapposizione* di entrambe.

Le particelle possono anche essere in «entanglement» l'una con l'altra: se guardiamo una mela e la troviamo rossa, l'altra diventa immediatamente gialla.

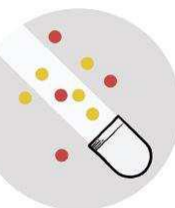
L'entanglement esiste indipendentemente dalla distanza tra le particelle.

Einstein rifiutò di accettare questo concetto, definendolo «inquietante azione a distanza».

Affermò che dovevano esistere variabili nascoste locali, sconosciute agli osservatori, che controllano l'entanglement, perché altrimenti le influenze devono viaggiare più velocemente della luce.

Nel 1964 John Bell scoprì che la teoria quantistica è in conflitto con qualsiasi teoria locale che coinvolga variabili nascoste. Trovò un modo per testare se le variabili nascoste locali possano spiegare l'apparente «azione inquietante».

Il test di Bell: due osservatori effettuano misurazioni separate su due particelle apparentemente entangled. Bell calcolò la quantità massima di correlazione che può emergere tra i risultati dei due osservatori se sono all'opera variabili nascoste locali limitate dalla velocità della luce.

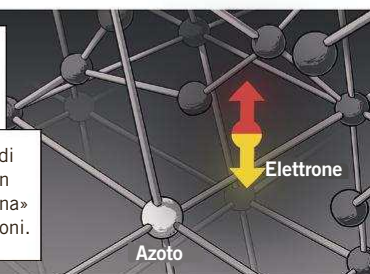
Gli sperimentatori hanno cominciato presto a mettere in pratica il test. Ma c'erano due scappatoie che lasciavano alcune possibilità alle variabili nascoste.

1. Scappatoia della località
Le postazioni di misurazione sono abbastanza vicine da permettere la comunicazione tra loro a velocità inferiore a quella della luce in un esperimento.

2. Scappatoia del rilevamento
I rivelatori sono in grado di misurare solo alcune ma non tutte le particelle entangled.

Nel 2015 diversi gruppi di scienziati hanno escogitato versioni del test di Bell che chiudono entrambe le scappatoie.

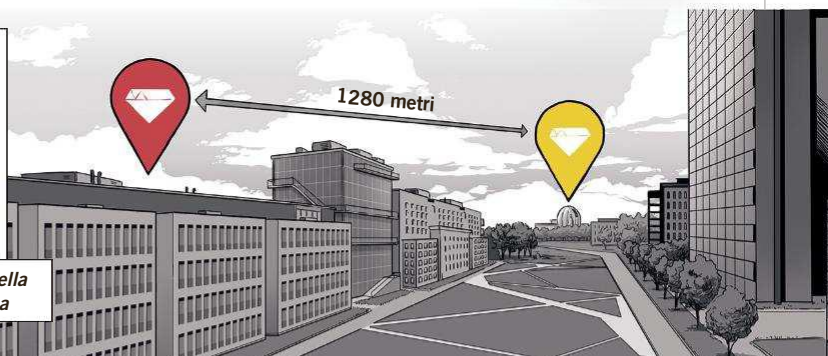
Uno, alla Technische Universiteit di Delft, inizia con due minuscoli diamanti.

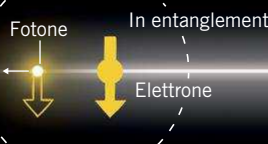
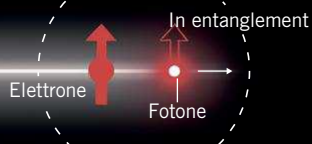
Nel reticolo di carbonio quasi perfetto di un diamante può esistere un difetto, un occasionale atomo di azoto.

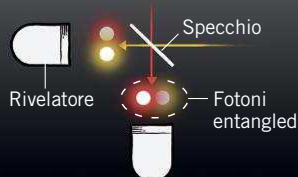
In alcuni punti, accanto a uno di questi atomi di azoto, manca un atomo di carbonio: è una «lacuna» che fa da trappola per gli elettroni.

Gli elettroni hanno uno spin...

Su ***Giù***

O in una *sovrapposizione*, sia su sia giù.

Usando due elettroni, in due diamanti a una distanza di 1280 metri, si può essere sicuri che non c'è il tempo per una comunicazione, neppure alla velocità della luce, nel tempo necessario per determinare l'impostazione della misurazione e rilevare lo spin dell'elettrone.

Gli scienziati usano i laser per eccitare gli elettroni, che poi emettono fotoni che sono in entanglement con lo spin degli elettroni.

Fotone
In entanglement
Elettrone

Questi fotoni attraversano il campus fino a incontrarsi nei rivelatori.

Quando i fotoni si incontrano diventano entangled fra loro. Per estensione, anche i rispettivi elettroni distanti – che sono più facili da rilevare e misurare rispetto ai fotoni – diventano entangled.

Scappatoia del rilevamento chiusa

Per la prima volta, un test di Bell senza scappatoie

A Delft gli scienziati hanno effettuato 245 prove in cui due elettroni a 1280 metri di distanza erano entangled. Misurando ogni volta le particelle, hanno trovato che l'80 per cento era correlato, significativamente più di quanto sarebbe possibile con variabili nascoste locali. Esperimenti in Stati Uniti, Austria e Germania hanno dato risultati simili.

Questi risultati forniscono la dimostrazione definitiva che le variabili nascoste locali non possono spiegare le conseguenze dell'entanglement.

L'universo è veramente bizzarro.

Illustrazione di Matthew Twombly; fonte: modificato da *TU Delft—A loophole-free Bell test.* testo di Michel van Baal e grafica Scixel. TU Delft, 2015

determinate pochissimo prima della misurazione, quindi i segnali nascosti avrebbero dovuto viaggiare più velocemente della luce per influenzare questo esperimento. La scappatoia della località era saldamente chiusa.

Questi esperimenti però avevano un problema: è difficile lavorare con i fotoni. La maggior parte delle volte nei test non si otteneva nessuna risposta, semplicemente perché non erano stati generati i fotoni o perché erano stati persi lungo la strada. Gli sperimentatori erano costretti ad assumere che le prove che funzionavano fossero rappresentative dell'insieme completo delle prove (l'«ipotesi di campionamento equo»). Se però si abbandona questa ipotesi, i risultati non violano più la disuguaglianza di Bell: è possibile che nelle prove in cui si erano persi i fotoni succedesse qualcosa di diverso e che, includendo anche i dati di quelle prove, i risultati non siano in conflitto con le teorie a variabili nascoste locali. Gli scienziati sono riusciti chiudere questa scappatoia del rilevamento solo in questo secolo, rinunciando ai fotoni e usando la materia, sotto forma di ioni intrappolati, atomi, circuiti superconduttori e nuclei negli atomi di diamante, tutti oggetti che possono essere entangled e misurati con grande efficienza. Il problema è che in questi casi le particelle si trovano estremamente vicine l'una all'altra, lasciando aperta la scappatoia della località. Quindi, sebbene questi test della disuguaglianza di Bell fossero ingegnosi, potevano tutti, almeno in linea di principio, essere spiegati da una teoria a variabili nascoste locali. Una delle più grandi sfide della scienza quantistica era un test della disuguaglianza di Bell che chiudesse simultaneamente tutte le scappatoie.

Grazie ai rapidi progressi nei mezzi per controllare e misurare i sistemi quantistici, nel 2015, 80 anni dopo l'articolo EPR e 51 anni dopo l'equazione di Bell, è stato possibile verificare la disuguaglianza di Bell nell'ambiente ideale, un test di Bell privo di scappatoie. Nel giro di poco tempo addirittura quattro diversi gruppi di ricerca hanno trovato risultati che violano la disuguaglianza di Bell chiudendo tutte le scappatoie e fornendo prove solide contro le teorie a variabili nascoste locali.

Chiudere le scappatoie

Uno di noi (Hanson) e i suoi collaboratori hanno condotto il primo esperimento per chiudere tutte le scappatoie al Politecnico di Delft, nei Paesi Bassi, usando un allestimento (*si veda il box alle pagine precedenti*) che ricorda da vicino l'idea originale di EPR. Abbiamo posto in entanglement gli spin di due elettroni, ciascuno contenuto in una lacuna di un diamante, cioè uno spazio in cui mancava un atomo di carbonio che avrebbe dovuto esserci. I due elettroni entangled erano in laboratori diversi del campus, e per assicurarci che non ci fosse comunicazione tra loro abbiamo usato un generatore di numeri casuali veloce per scegliere la direzione lungo cui misurare. La misurazione era conclusa e registrata localmente su un disco rigido prima che potesse arrivare alla velocità della luce qualsiasi eventuale informazione dalla misurazione sull'altro elettrone. Un segnale nascosto che dicesse a una stazione di misurazione quale direzione aveva usato l'altra non avrebbe avuto il tempo di viaggiare da un laboratorio all'altro, e quindi la scappatoia della località era saldamente chiusa.

Questi vincoli stretti sui tempi ci hanno imposto di separare i due elettroni di oltre un chilometro, circa due ordini di grandezza in più rispetto al precedente primato mondiale di distanza per sistemi di materia in entanglement. Abbiamo ottenuto questa separazione usando una tecnica chiamata *entanglement swapping*: iniziamo ponendo in entanglement ogni elettrone con un fotone; inviamo quindi i fotoni a incontrarsi a metà strada tra i due laboratori su uno specchio semitrasparente su cui abbiamo posto rivelatori su entrambi i lati. Se rileviamo i fotoni su lati opposti dello specchio, allora gli spin degli elettroni in entanglement con ciascun fotone si pongono in entanglement fra loro; in altre parole, l'entanglement tra gli elettroni e i fotoni si trasferisce ai due elettroni. Questo processo può fallire facilmente: i fotoni possono perdersi tra i diamanti e lo specchio, come nei precedenti esperimenti basati sui fotoni. Noi però iniziamo un test di Bell solo se vengono rilevati entrambi i fotoni; ci occupiamo cioè della perdita di fotoni prima dell'inizio. In questo modo chiudiamo la scappatoia del rilevamento perché non escludiamo i risultati di nessun test di Bell dai nostri risultati finali. La perdita di fotoni dovuta all'ampia separazione del nostro esperimento non limita quindi la

Gli scienziati hanno ottenuto l'ambiente ideale per il test della disuguaglianza passando dai fotoni alla materia

qualità dell'entanglement, ma limita fortemente la velocità a cui possiamo condurre i test di Bell: solo pochi all'ora.

Dopo aver condotto l'esperimento ininterrottamente per varie settimane, nel giugno 2015, abbiamo scoperto che la disuguaglianza di Bell veniva violata anche di un 20 per cento, in pieno accordo con le previsioni della meccanica quantistica. La probabilità che questi risultati potessero apparire in un modello a variabili nascoste locali – anche ammettendo che i dispositivi avessero cospirato contro di noi facendo uso di tutti i dati disponibili – era 0,039. Un secondo ciclo di esperimenti effettuato nel dicembre 2015 ha rilevato una violazione simile delle disuguaglianze di Bell.

Nello stesso anno, altri tre gruppi hanno effettuato test di Bell privi di scappatoie. A settembre un gruppo di fisici del National Institute of Standards and Technology (NIST) e i loro colleghi, diretti da uno di noi (Shalm), ha usato fotoni entangled, e lo stesso mese anche il gruppo di Zeilinger ha fatto altrettanto. Non molto tempo dopo, Harald Weinfurter, della Ludwig-Maximilians-Universität di Monaco di Baviera, e il suo gruppo hanno usato atomi di rubidio separati da 400 metri con un allestimento simile a quello di Hanson (i risultati sono stati pubblicati nel 2017).

Sia al NIST che a Vienna hanno posto in entanglement gli stati di polarizzazione di due fotoni usando laser intensi per eccitare uno speciale materiale cristallino. In casi rarissimi, circa uno su un miliardo, entrando nel cristallo un fotone del laser subiva una trasformazione e si scindeva in una coppia di fotoni figli i cui stati di polarizzazione erano entangled. Con laser abbastanza potenti è stato possibile generare decine di migliaia di coppie di fotoni entangled al secondo. Abbiamo quindi inviato questi fotoni a stazioni lontane tra loro (a una distanza di 184 metri nell'esperimento del NIST e 60 metri nell'esperimento di Vienna) in cui abbiamo misurato gli stati di polarizzazione. Mentre i fotoni erano in volo verso le stazioni di misurazione, il nostro sistema decideva la direzione in cui misurarne la polarizzazione in un modo che rendeva impossibile influenzare i risultati a qualsiasi variabile nascosta.

La scappatoia della località era quindi chiusa. L'aspetto più impegnativo dell'uso dei fotoni è di impedire che vadano persi, poi-

ché dobbiamo rilevare più di due terzi dei fotoni che generiamo per evitare la scappatoia del rilevamento. La maggior parte dei rivelatori convenzionali di singoli fotoni funziona con un'efficienza di circa il 60 per cento: per il nostro test avrebbe significato un fallimento in partenza. Al NIST abbiamo però sviluppato speciali rivelatori di singoli fotoni, fatti di materiali superconduttori freddi, in grado di osservare oltre il 90 per cento dei fotoni che li raggiungono, e così abbiamo chiuso anche la scappatoia del rilevamento.

Ripetendo le misurazioni di polarizzazione su molte diverse coppie di fotoni entangled, per più di 100.000 volte al secondo, abbiamo accumulato rapidamente statistiche sulle correlazioni tra gli stati di polarizzazione dei fotoni. Le correlazioni osservate in entrambi gli esperimenti erano molto più elevate di quelle previste dalle teorie a variabili nascoste. La probabilità che i risultati del NIST siano dovuti al caso è dell'ordine di uno su un miliardo (anche più improbabile che indovinare una sestina al SuperEnalotto), e la probabilità è addirittura inferiore per l'esperimento di Vienna. Oggi il nostro gruppo del NIST usa regolarmente una versione migliorata del nostro esperimento per violare le diseguaglianze di Bell a un livello simile in meno di un minuto, e i miglioramenti futuri ridurranno questo tempo di due ordini di grandezza.

Le tecniche sviluppate nell'ambito degli esperimenti di Bell rendono possibili nuovi tipi di reti di comunicazione

Sfruttare l'entanglement

Questi esperimenti ci obbligano a concludere che qualsiasi modello a variabili nascoste locali, come quelli sostenuti da Einstein, è incompatibile con la natura. Le correlazioni che abbiamo osservato tra le particelle vanno contro il nostro intuito, e mostrano che l'inquietante azione a distanza ha effettivamente luogo.

I nostri risultati fanno anche ritenere che sia possibile usare concretamente la grande potenza insita nell'entanglement. Un'applicazione a breve termine in cui possono essere utili i test di Bell privi di scappatoie è la generazione di casualità. I numeri casuali sono una risorsa critica in molte tecniche crittografiche e per la sicurezza. Se si riesce a prevedere il numero successivo prodotto da un generatore di numeri casuali, è possibile violare molti sistemi finanziari e di comunicazione: una buona fonte di casualità in cui sia impossibile formulare previsioni è quindi di vitale importanza. Due dei modi più comuni per generare casualità sono l'uso di algoritmi matematici e quello di processi fisici. Con gli algoritmi matematici, se si conoscono le condizioni usate come «seme», è spesso possibile prevedere perfettamente l'output. Nei processi fisici è necessaria una comprensione dettagliata dei meccanismi fisici alla base del sistema; se ci sfugge anche un singolo dettaglio un hacker può sfruttare o controllare la casualità. La storia della crittografia è costellata di esempi in cui sono stati violati generatori di numeri casuali di entrambi i tipi.

Ma la meccanica quantistica ci ha fatto un dono: è possibile «estrarre» la casualità insita nei processi quantistici per produrre elementi veramente casuali. Le correlazioni misurate in un test di Bell privo di scappatoie possono essere distillate in una stringa di cui si può garantire la casualità. La cosa notevole è che sarebbe possibile mettere parte dell'apparato sperimentale (la generazione di particelle entangled) nelle mani di un potenziale hacker per controllarlo, e anche in questo caso estremo si potrebbero produrre numeri dotati di tutta la casualità permessa dalla natura. All'inizio del 2018 il nostro gruppo al NIST è stato in grado di usare il nostro test di Bell senza scappatoie per estrarre 1024 bit veramente casuali da dieci minuti di dati sperimentali. Questi bit sono stati certificati come casuali con un errore inferiore a una parte su 1000 miliardi. Con un generatore tradizionale servirebbero diverse centinaia di migliaia di anni per acquisire dati a sufficienza da poterne misurare direttamente la qualità della casualità allo stesso livello. Ora lavoriamo per incorporare il nostro generatore di numeri casuali in un trasmettitore pubblico di casualità. Questo strumento funzionerebbe da sorgente di numeri casuali con certificazione dei tempi, trasmessa su Internet a intervalli fissi e utilizzabile in applicazioni di sicurezza da chiunque ne abbia bisogno.

Più in generale, le tecniche sviluppate negli esperimenti di Bell privi di scappatoie rendono possibili tipi di reti di comunicazione nuovi. Reti di questo tipo, talvolta chiamate «Internet quantistica», possono svolgere attività fuori dalla portata delle reti di informazione classiche. Un'Internet quantistica potrebbe permettere comunicazioni sicure, sincronizzazioni temporali, reti di sensori quantistici, nonché un accesso sicuro a computer quantistici remoti nel *cloud*. Un altro obiettivo è la «crittografia indipendente dai dispositivi», in cui (in stretta analogia con il trasmettitore pubblico di casualità) gli utenti possono convalidare la segretezza di una chiave condivisa attraverso una violazione delle disuguaglianze di Bell.

La spina dorsale di una futura Internet quantistica sarà formata da collegamenti di entanglement, come nelle configurazioni usate per testare le disuguaglianze di Bell con lacune dei diamanti, atomi intrappolati e fotoni. Nel 2017 il nostro gruppo di Delft ha dato dimostrazione pratica di un metodo per aumentare la qualità degli spin remoti entangled, e nel 2018 abbiamo migliorato il tasso degli entanglement di tre ordini di grandezza. Sulla base di questi progressi, i ricercatori lavorano a una prima versione rudimentale di un'Internet quantistica che dovrebbe essere realizzata tra alcune città dei Paesi Bassi nel 2020.

Ottant'anni fa, quando la teoria quantistica era in corso di elaborazione, gli scettici avevano da ridire sulle apparenti contraddizioni con i secoli di intuizione fisica preesistente; ora quattro esperimenti hanno inferto il colpo finale a quell'intuizione. Allo stesso tempo, questi risultati hanno aperto la porta allo sfruttamento della natura in modi che Einstein e Bell non avrebbero potuto prevedere. La silenziosa rivoluzione avviata da John Bell è in pieno svolgimento. ■

PER APPROFONDIRE

Loophole-Free Bell Inequality Violation Using Electron Spins Separated by 1.3 Kilometres. Hensen B. e altri, in «Nature», Vol. 526, pp. 682-686, 29 ottobre 2015.

Significant-Loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons. Giustina M. e altri, in «Physical Review Letters», Vol. 115, articolo n. 250401, pubblicato on line, 16 dicembre 2015.

Strong Loophole-Free Test of Local Realism. Shalm L.K. e altri, in «Physical Review Letters», Vol. 115, articolo n. 250402, pubblicato on line, 16 dicembre 2015.

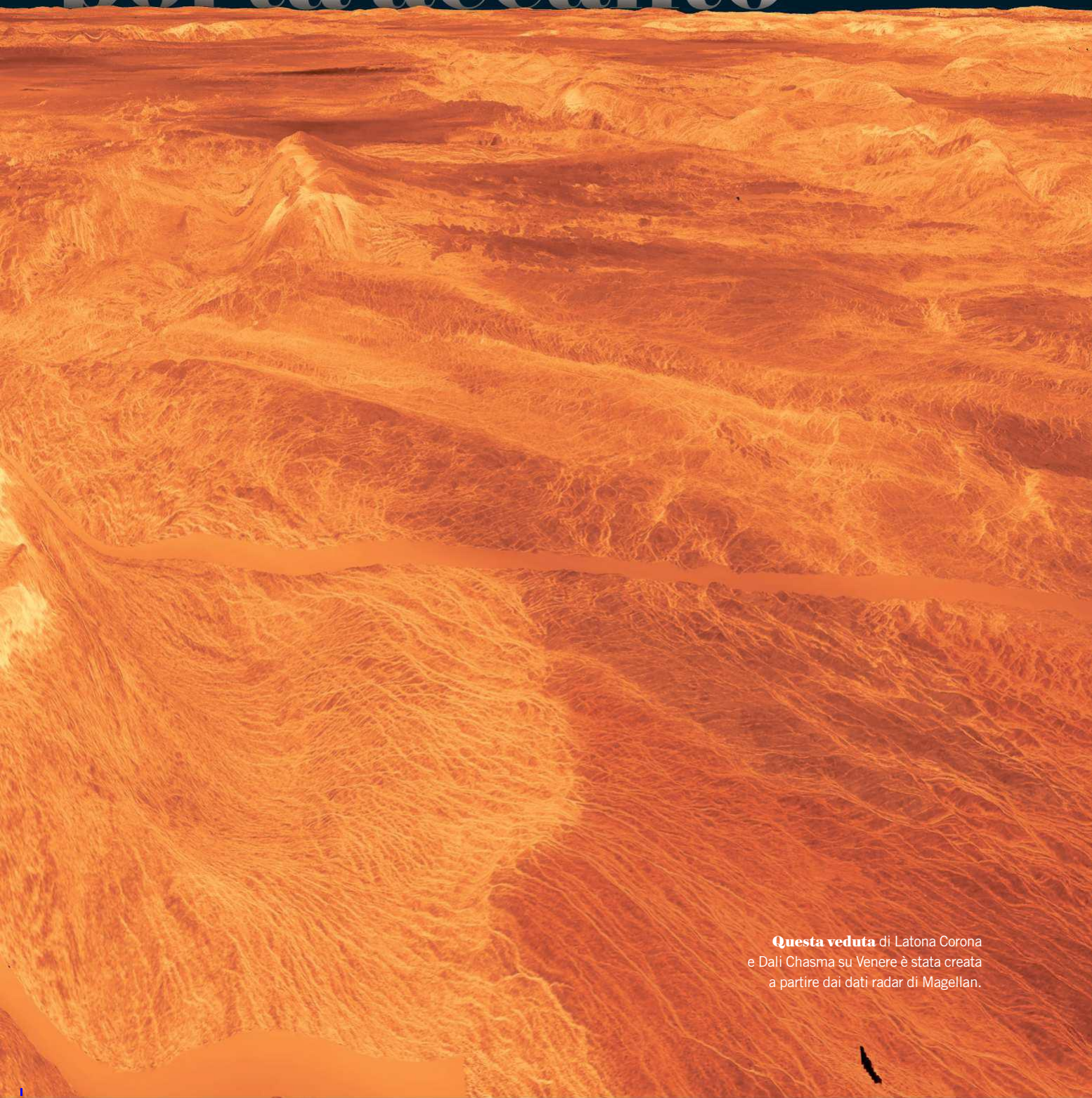
Entanglement quantistico e geometria. Maldacena J.M., in «Le Scienze» n. 570, febbraio 2016.

PLANETOLOGIA

L'esopianeta della

Che cosa può insegnarci Venere sui pianeti molto lontani dal nostro sistema solare

di M. Darby Dyar, Suzanne E. Smrekar e Stephen R. Kane

porta accanto

Questa veduta di Latona Corona e Dali Chasma su Venere è stata creata a partire dai dati radar di Magellan.

M. Darby Dyar è una spettroscopista che studia minerali e vetri extraterrestri provenienti da Luna, Marte, comete e asteroidi. È *senior scientist* al Planetary Science Institute e Kennedy-Schelkunoff Professor of Astronomy al Mount Holyoke College, negli Stati Uniti.

Suzanne E. Smrekar studia i diversi percorsi evolutivi dei pianeti rocciosi, con occasionali ricerche sul campo presso i vulcani. È senior *research scientist* e *deputy principal investigator* della missione InSight al Jet Propulsion Laboratory della NASA.

Stephen R. Kane è un astrofisico planetario che ha scoperto centinaia di esopianeti e ne studia la potenziale abitabilità. È professore associato al Dipartimento di scienze della Terra dell'Università della California a Riverside, negli Stati Uniti.

Nel 1982, al Dipartimento di scienze planetarie del Massachusetts Institute of Technology non si parlava d'altro che dell'annullamento dell'imminente missione di punta della NASA, il Venus Orbital Imaging Radar (VOIR). All'epoca uno di noi (Dyar) stava facendo lì il dottorato (gli altri due erano ancora rispettivamente all'università e alle elementari.) I dottorandi piangevano per i corridoi, e professori e ricercatori scuotevano la testa. Il presidente Reagan, da poco eletto, fu responsabile di ampi tagli alle esplorazioni spaziali, e il VOIR fu una delle vittime.

Poco tempo dopo, però, gli scienziati misero insieme il progetto di un veicolo spaziale ultraeconomico (680 milioni di dollari) fatto di materiali avanzati, e così, miracolosamente, riuscirono a salvare la missione. Nel 1989 fu lanciato l'*orbiter* Magellan per una missione di ricognizione su Venere, e nel 1990 era entrato in orbita. Nel corso dei cinque anni successivi l'orbiter inviò immagini radar quasi globali, dati sulla gravità e una carta topografica del secondo pianeta per distanza dal Sole. Era l'ultima di una lunga serie di missioni sovietiche e statunitensi sul nostro vicino planetario, ma quando nel 1994 Magellan si lanciò contro la superficie di Venere, insieme a lui venne meno il supporto della NASA alle sonde su Venere. Da allora gli scienziati hanno presentato più di 25 proposte per nuove missioni su Venere e, sebbene alcune di esse abbiano ricevuto giudizi molto favorevoli da parte delle commissioni di valutazione, nessuna è stata approvata. Ancor oggi alla base delle nostre conoscenze sulla geologia venusiana ci sono i dati ormai vecchi di decenni raccolti da Magellan.

Noi planetologi, però, non ci arrendiamo mai e siamo riusci-

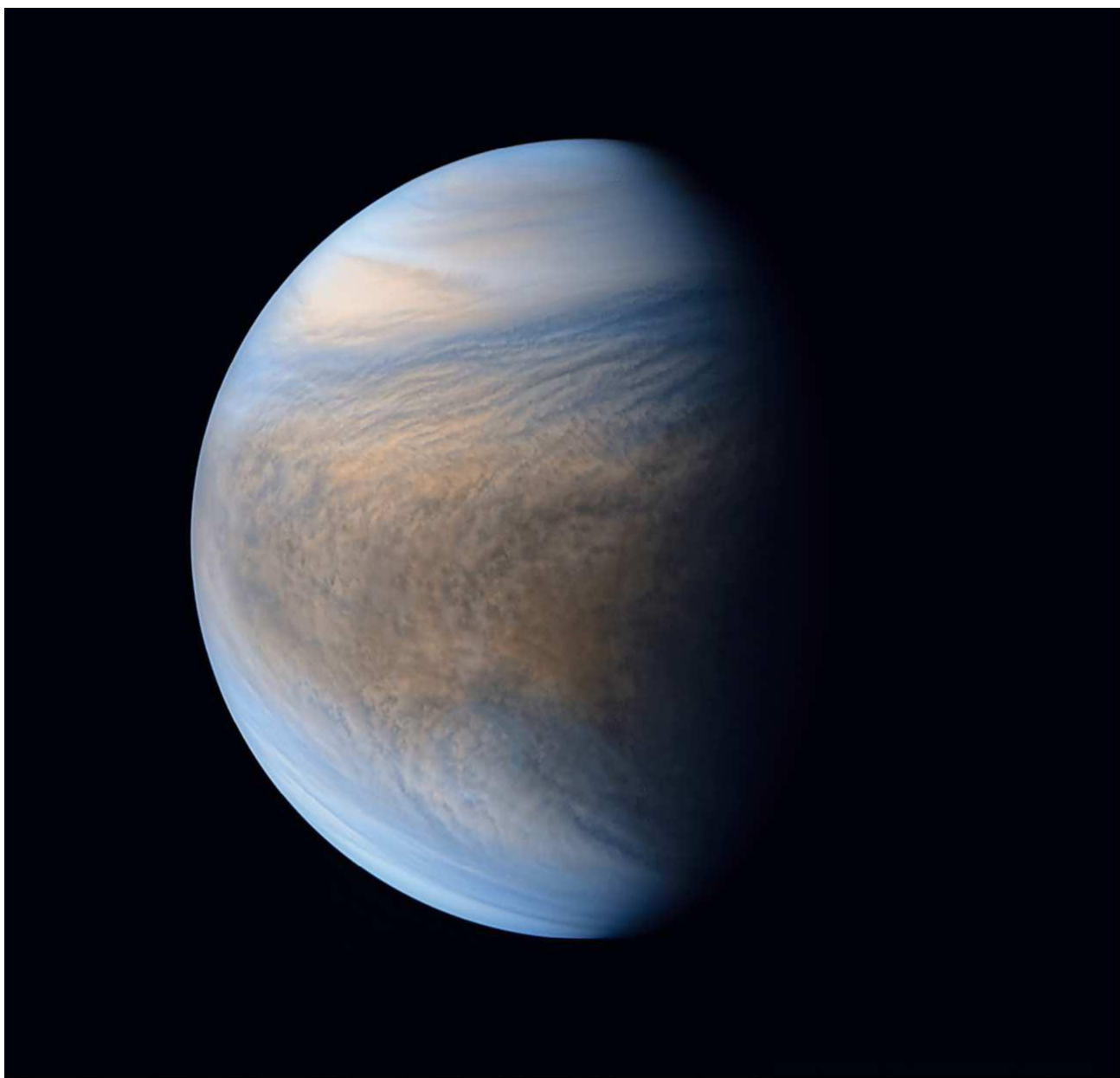
IN BREVE

In origine Venere e la Terra erano piuttosto simili, ma a un certo punto i due pianeti hanno cominciato a divergere: la Terra è andata per una via che ha portato agli oceani e a un'atmosfera.

La superficie di Venere, nel frattempo, diventava inospitale per la vita, ma questo pianeta vicino ha ancora un vulcanismo attivo e cenni di una nascente tettonica a placche.

Capire perché Venere si sia evoluta così può chiarirci le idee sulla possibilità che i tanti esopianeti suoi simili ospitino la vita. È necessaria una nuova missione su questo pianeta.

NASA/JPL (*Pagine precedenti*)

JAXA/ISAS/DARTS/DAMIA BOUIC

L'atmosfera di Venere, come mostra questa immagine ottenuta a partire da dati della sonda Akatsuki della Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), contiene dense nubi di acido solforico.

ti ugualmente a fare progressi nello scoprire i segreti di questo mondo. Dopo Magellan, l'Agenzia spaziale europea e quella giapponese hanno inviato missioni su Venere, portando a scoperte importanti per la conoscenza della sua atmosfera. Nel frattempo è stato necessario riscrivere quello che sapevamo sul nostro vicino planetario, grazie a nuove analisi dei dati di Magellan. Attualmente riteniamo che Venere sia ricca di vulcani e abbiamo persino trovato tracce di inizio di una tettonica a placche, che gli scienziati ritengono sia fondamentale per l'abitabilità di un pianeta. Nuovi modelli teorici suggeriscono anche che Venere possa aver avuto acqua liquida in superficie fino a relativamente tardi, il che significa che potrebbe essere stata in grado di accogliere la vita molto più a lungo di quanto pensassimo in passato.

Tutto questo coincide con un altro straordinario passo avanti dell'astronomia: la scoperta di migliaia di pianeti extrasolari in altri sistemi; molti di essi hanno dimensioni e una distanza dalle rispettive stelle simili a quelle di Venere. Quello che apprendiamo sul pianeta nostro vicino ci può insegnare qualcosa su questi mondi lontani e inaccessibili. In particolare, se riusciremo a capire se e quando Venere possa aver avuto le condizioni per ospitare la vita, ne sapremo di più sulla probabilità di trovare esseri viventi sugli innumerevoli corpi celesti simili a Venere in giro per la Via Lattea.

Analoghi esoplanetari

La maggior parte degli esopianeti scoperti finora sono stati trovati usando il metodo del transito: si osserva una stella in cerca di significative fluttuazioni della sua luminosità, che si verificano quando le passano davanti pianeti in orbita. Con questa tecnica

possiamo misurare le dimensioni di un pianeta lontano, ma le dimensioni da sole non ci dicono molto. Dopo tutto, se un osservatore extraterrestre osservasse il sistema solare usando il metodo del transito, Venere e la Terra sembrerebbero quasi identici. Eppure Venere è proibitiva per la vita, mentre la Terra è abitabile ininterrottamente da 4 miliardi di anni.

Possiamo distinguere ulteriormente tra pianeti di dimensioni simili misurando le loro distanze dalle rispettive stelle. La «zona abitabile» è la regione attorno a una stella all'interno della quale un pianeta roccioso può avere acqua liquida in superficie. La Terra, ovviamente, si trova in questa zona. Pensiamo che anche Venere ci si sia trovata, e anche per un bel po'. I confini della zona abitabile, tuttavia, si spostano nel tempo verso l'esterno, via via che la luminosità del Sole aumenta con l'età. Oggi Venere è al di fuori di questo intervallo e occupa quella che chiamiamo appunto la «zona di Venere», dove le condizioni alla superficie sono così calde che un pianeta ha verosimilmente un'atmosfera fuori controllo che ne fa bollire gli oceani.

Venere e Terra si sono formate in condizioni molto simili, comprese quelle che hanno dato alla Terra i suoi oceani. Probabilmente gli impatti delle comete hanno portato il ghiaccio sulla superficie di entrambi i pianeti. Presumibilmente il vento solare (le particelle cariche che provengono dal Sole) ha depositato un sottile strato di ioni idrogeno sulla superficie di entrambi. E quando Venere e la Terra erano protopianeti in formazione dal disco di polvere primordiale che circondava il Sole, entrambi hanno raccolto idrogeno e altre sostanze volatili, ovvero che possono facilmente evaporare. Le simulazioni dell'antica Venere mostrano che sulla superficie del pianeta potrebbe esserci stata acqua prima che sulla Terra, e che potrebbe esserci rimasta fino a circa un miliardo di anni fa.

Non abbiamo mai avuto motivi migliori per inviare una nuova grande missione sul secondo pianeta dal Sole, spesso ignorato

Resta tuttavia il fatto che oggi Venere è del tutto inospitale. Che cos'è successo? Venere rappresenta lo stato finale di tutti i pianeti abitabili oppure è semplicemente uno dei tanti esiti che può avere un pianeta di queste dimensioni? Sono alcune delle domande più importanti che ci hanno spinto a voler tornare su Venere.

Superficie celata

La nostra conoscenza di Venere è in parte limitata dall'immensa difficoltà di condurre osservazioni attraverso l'atmosfera densa e nociva del pianeta. In alto è avvolto da nuvole di acido solforico; a livello del terreno la pressione atmosferica è paragonabile alla pressione dell'acqua a quasi 1000 metri sotto la superficie degli oceani terrestri. A questo livello l'atmosfera è così densa che il suo principale costituente, l'anidride carbonica, si comporta come un fluido supercritico, con proprietà a metà strada tra un gas e un liquido.

Gli scienziati ritengono che un tempo questa atmosfera fosse simile a quella della Terra. A differenza del nostro mondo, però, Venere è attualmente priva di un campo magnetico che respinge il vento solare. Quindi pensiamo che nel corso degli eoni questo vento solare abbia eliminato l'acqua del pianeta, scindendola in ioni idrogeno e ossigeno e trasportandoli nello spazio. Senza acqua in superficie in cui possano dissolversi l'anidride carbonica e gli altri gas che emergono costantemente dall'interno, questi composti si accumulano nell'atmosfera. A causa dell'effetto serra di questa atmosfera, le temperature alla superficie di Venere sono più alti di poco più di 400 gradi Celsius rispetto a quelle della Terra, sufficienti a rendere incandescenti le rocce.

Gli unici dati che abbiamo dalla superficie di Venere sono quelli raccolti dai quattro *lander* sovietici Venera che hanno toccato il suolo venusiano negli anni settanta e ottanta. Queste sonde sono sopravvissute solo per pochi minuti sulla violenta superficie del pianeta, ma in quel breve tempo hanno effettuato e inviato misurazioni approssimative della composizione chimica. Oltre a queste letture, la nostra conoscenza della mineralogia di superficie si basa esclusivamente su interpretazioni controverse delle misurazioni radar effettuate da Magellan e sulla nostra limitata conoscenza delle possibili reazioni chimiche tra le rocce del pianeta e i gas atmosferici nelle condizioni di Venere.

Recentemente però si è scoperto che è possibile mappare i minerali presenti su Venere grazie a osservazioni orbitali attraverso diverse «finestre» nello spettro elettromagnetico dove la luce visibile riesce a non essere assorbita dall'anidride carbonica dell'atmosfera. Il caso vuole che queste finestre coincidano con le regioni critiche per identificare i tipici minerali planetari olivina e pirosseno, il che ci fa sperare di riuscire finalmente a determinare i componenti di Venere. La sonda europea Venus Express, che ha orbitato attorno a Venere dal 2006 al 2014, ha usato una di queste finestre per produrre la prima mappa del calore che si irradia dalla superficie del pianeta su gran parte dell'emisfero meridionale. Questa mappa include le caratteristiche spettrali – massimi e minimi della luce e del calore – che possono identificare i minerali del suolo.

La mappa identifica anche molti «hot-spot», ovvero aree che emettono tanto calore che la spiegazione più probabile è un vulcanismo recente. È una scoperta entusiasmante, perché mostra che – a differenza della Luna, silenziosa da tempo, e di Marte, dove il vulcanismo moderno è stato al massimo isolato – Venere è ancora attiva, e questa scoperta ha conseguenze sull'idoneità del pianeta a ospitare vita.

Tettonica a placche

Sulla Terra il vulcanismo è solitamente associato alla tettonica a placche, cioè quegli spostamenti di grandi parti della crosta terrestre che sono responsabili della maggior parte dei fenomeni geologici del nostro pianeta. Alla tettonica a placche si devono anche i cicli climatici a lungo termine, su periodi di circa 100 milioni di anni, che hanno permesso alla vita di emergere sulla Terra. La tettonica a placche ha formato nuove porzioni di crosta dalle dorsali in mezzo agli oceani terrestri e ha permesso a strati di crosta di sprofondare nel mantello, due processi che fanno sì che il nostro pianeta perda il suo calore interno e si raffreddi al punto da rendere possibile la vita. La tettonica ha anche liberato in atmosfera composti volatili come acqua, anidride carbonica e diossido di zolfo dalle profondità terrestri, facendoli poi tornare nel mantello quando le placche scivolano una sotto l'altra.

Senza il vulcanismo ci sarebbe poca acqua in superficie e nessun posto adatto all'origine della vita. Questo ciclo di sostanze vo-

Confronti planetari

Che cosa rende abitabile un pianeta? È una delle domande più importanti dell'astronomia. Inizialmente Terra e Venere erano abbastanza simili, ma una ora è un baluardo della vita, mentre l'altra è una landa desolata inospitale.

Studiando lo sviluppo del vulcanismo, della tettonica a placche e di altre caratteristiche di Venere, gli scienziati sperano di capire l'evoluzione di questo pianeta e le prospettive della vita sui molti esopianeti analoghi a Venere che si trovano in tutta la Via Lattea.

Attività vulcanica/tettonica
Il vulcanismo e il relativo processo di spostamento delle placche planetarie svolgono un ruolo importante nell'abitabilità della Terra. Contribuiscono a mantenere atmosfera, oceani e continenti necessari per sostenere la vita. Venere è l'unico altro pianeta interno con segni attuali di entrambi i fenomeni.

Presenza di acqua liquida in superficie
L'acqua, ingrediente chiave per la vita, era presente tra i componenti fondamentali dei pianeti ed è stata rilasciata in superficie dal vulcanismo, con contributi secondari dovuti agli impatti delle comete. Dopo la Terra, è probabile che Venere sia il pianeta che ha trattenuto più a lungo i suoi oceani.

Condizioni favorevoli alla vita basata sul DNA
Possiamo solo formulare ipotesi su quando e per quanto tempo ogni pianeta abbia avuto gli ingredienti necessari per ospitare la vita. C'è però ragione di credere che Venere sia diventata un mondo abitabile prima della Terra e che abbia trascorso più di un miliardo di anni con le condizioni necessarie per la vita.

Zona abitabile
È l'area attorno a una stella dove i pianeti possono avere acqua liquida e quindi potenzialmente la vita. Poiché la luminosità del Sole è aumentata nel tempo, i confini della zona si sono spostati verso l'esterno del sistema solare.

Grafica di Tiffany Farrant-Gonzalez

Le mappe globali di Venere costruite grazie ai dati delle sonde Magellan e Venera mostrano varie strutture, tra cui Artemis Corona, di forma circolare (*nel riquadro*), che sono possibili indizi della tettonica a placche.

NASA/JPL/USGS

latili contribuisce a sostenere l'atmosfera della Terra, che è stata fondamentale per l'emergere della vita. Analogamente i continenti, che forniscono una piattaforma stabile e galleggiante al di sopra del livello del mare su cui la vita marina può evolversi passando alla terraferma, sono un prodotto della tettonica a placche. Per questi e molti altri motivi, è fondamentale capire se e perché Venere abbia o meno una tettonica a placche.

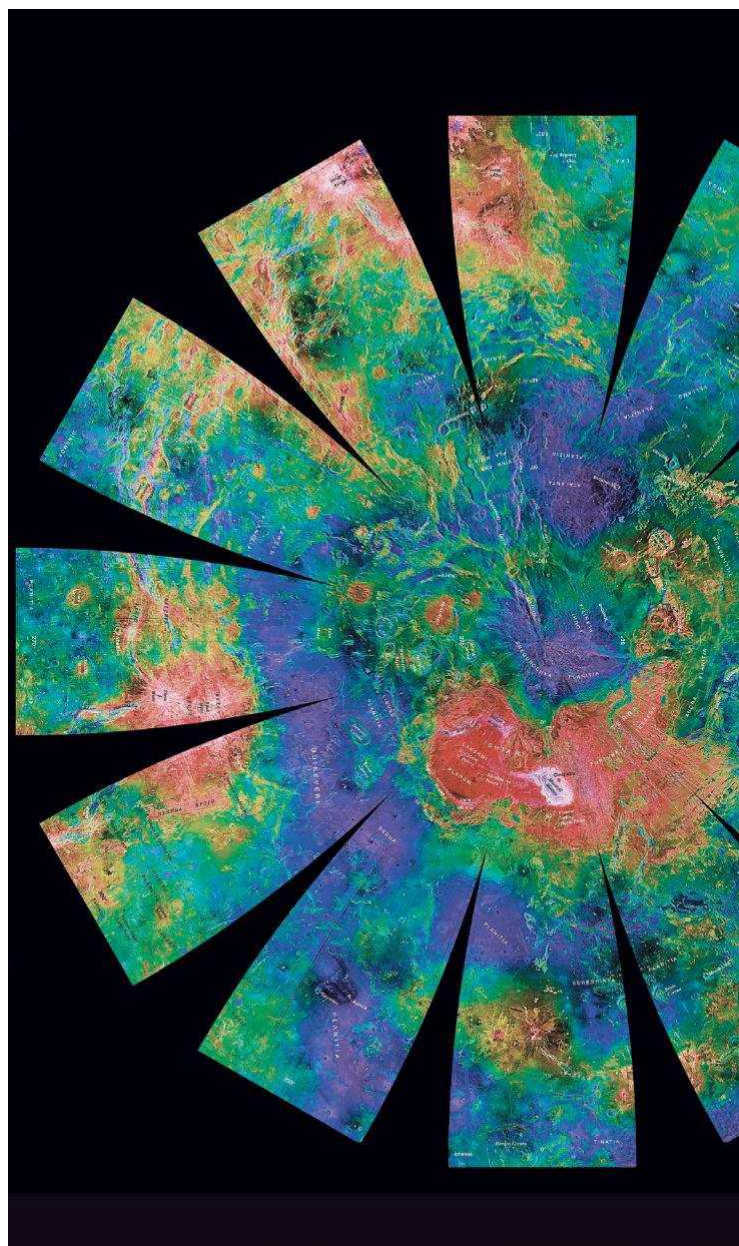
Sulla Terra, una quantità limitata di dati suggerisce che la tettonica a placche era iniziata già 4 miliardi di anni fa, lasciando poche tracce. Non sappiamo davvero come un pianeta passi dall'essere ricoperto di basalto, eventualmente con oceani, al diventare un intricato sistema di piastre mobili con caratteristiche complesse. Una delle principali ipotesi è che frammenti di materiale provenienti dalla profondità della Terra chiamati «pennacchi» irrompano sulla superficie, dando inizio alla subduzione, cioè allo scorrimento di una placca sotto un'altra. Il pennacchio caldo indebolisce la litosfera (che comprende crosta e mantello superiore) e la spinge verso l'alto, provocando spaccature della superficie, i cosiddetti *rift*. La pressione della testa del pennacchio può generare un vulcanismo violento, come lo si è osservato sulla Terra e su Venere. Il carico sulla litosfera incrinata può far affondare questo strato e indurre la subduzione, cosicché uno strato della litosfera scorre sotto l'altro.

Se questo processo si verifica abbastanza spesso, le placche in subduzione si collegano e inizia la tettonica a placche.

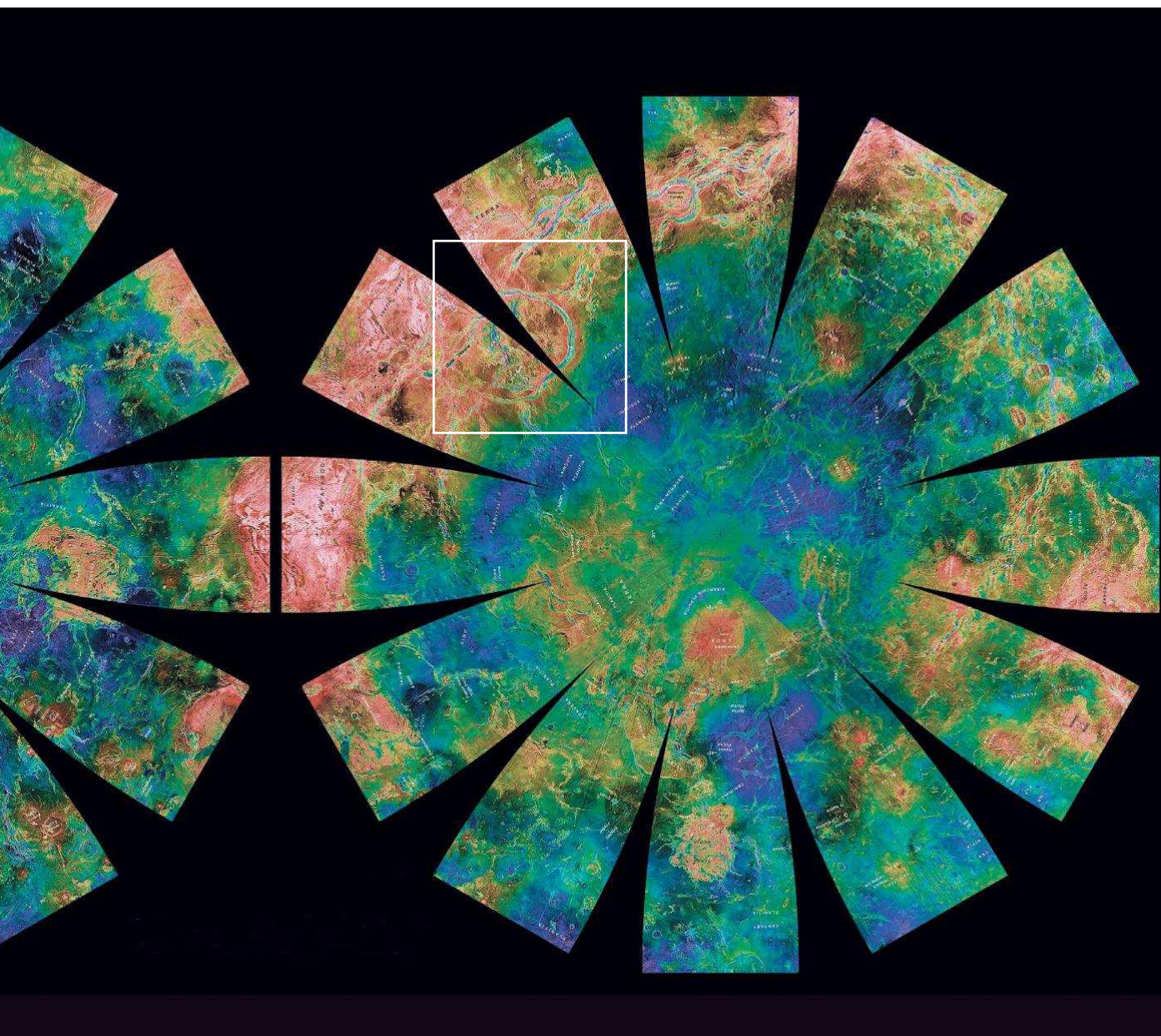
Ipotesi per un inizio

È possibile che questo stia avvenendo oggi su Venere. Attualmente la sua litosfera è calda e sottile, proprio come quella della Terra quando ha avuto inizio la tettonica a placche, e alcuni dati mostrano analogie interessanti tra alcune strutture di Venere e le zone di subduzione terrestre. Un esempio è Artemis Corona, una formazione circolare vicino all'equatore di Venere, che è simile per dimensioni e forma alla fossa delle Aleutine, che si trova sotto l'oceano lungo la costa dell'Alaska. Si è ipotizzato che queste strutture venusiane rappresentino punti in cui i pennacchi del mantello si sollevano verso la superficie e agiscono sulla crosta.

Inoltre recenti esperimenti di laboratorio e simulazioni al computer suggeriscono che questi pennacchi stanno generando la subduzione dove penetrano attraverso lo strato superiore della crosta. In particolare, gli esperimenti spiegano perché la subduzione sembra verificarsi solo lungo una parte del cerchio: quando la fragile litosfera si strappa al centro, si divide in spicchi, come la carta che si lacera se la si colpisce di punta con una matita. Quando la litosfera affonda, continua a frammentarsi formando segmenti; se questi segmenti dovessero unirsi, vedremmo l'inizio della tettonica a placche su Venere.

Le immagini disponibili per queste strutture hanno una risoluzione troppo bassa per dirci con certezza che cosa stiamo vedendo; sembra però di assistere alle prime fasi di sviluppo della tettonica a placche su Venere. Le osservazioni di Magellan non mostrano prove di placche interconnesse; vediamo invece punti isolati dove inizia la subduzione, ogni volta attorno a una di queste regioni circolari dove sembrano affiorare i pennacchi. A questo punto emergono due domande: perché la tettonica a placche non si è sviluppata prima, e che strada prenderà ora? Con il passare del tempo, Venere si raffredda sempre di più, e le faglie che si aprono potrebbero persistere, permettendo al pianeta di sperimentare la stessa transizione alla tettonica a placche verificatasi sulla Terra. Se stiamo assistendo all'inizio della tettonica a placche su Venere, allora questo processo e la stabilizzazione dell'atmosfera a esso associata possono essere comuni agli esopianeti sulla via dell'abitabilità.

Una visuale migliore

Non abbiamo mai avuto motivi migliori per inviare una nuova grande missione sul secondo pianeta per distanza dal Sole, spesso ignorato. Grazie alla possibilità di ottenere spettri e immagini globali ad alta risoluzione, saremmo in grado rispondere a domande importanti sul vulcanismo e sulla possibile tettonica a placche su Venere. Il processo sta realmente avvenendo ora? Che collega-

mento c'è fra l'attività in superficie e quello che accade all'interno del pianeta? Come influiscono le condizioni su Venere, per esempio la temperatura, sull'attività tettonica? Ed è possibile che alcune formazioni che osserviamo in superficie, come le grinze che gli scienziati chiamano *tesserae*, siano resti di un'epoca passata caratterizzata dalla presenza di acqua?

Nel corso del 2019 la NASA solleciterà proposte per il prossimo gruppo di sonde spaziali della sua classe più piccola, le missioni Discovery. Un altro di noi (Smrekar) e Dyar si stanno occupando di una proposta di missione denominata VERITAS (Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, and Spectroscopy), che mapperebbe la superficie in modo più dettagliato che mai. Avrebbe a bordo diversi strumenti, tra cui una telecamera e uno spettrometro, in modo da ottenere rilievi topografici migliorati di vari ordini di grandezza e una mappa composita globale del pianeta senza precedenti. Sono in cantiere anche altre proposte di missioni su Venere: i risultati finali si dovrebbero conoscere nel 2021.

Quasi trent'anni dopo l'arrivo di Magellan in orbita attorno a Venere, la generazione di scienziati che lo ha lanciato sta invecchiando e sta andando in pensione. Una missione su Venere permetterebbe a quei ricercatori di passare il testimone a una nuova generazione che può arrivare più vicino a capire perché la nostra sorella planetaria si sia evoluta in modo così diverso dalla Terra. Forse potremmo addirittura scoprire quali condizioni sono necessarie per l'emergere della vita. ■

PER APPROFONDIRE

Was Venus the First Habitable World of Our Solar System? Way M.J. e altri, in «Geophysical Research Letters», Vol. 43, n. 16, pp. 8376-8383, 28 agosto 2016.

Experimental and Observational Evidence for Plume-Induced Subduction on Venus. Davaille A., in «Nature Geoscience», Vol. 10, pp. 349-355, maggio 2017.

Cambiamenti climatici globali su Venere. Bullock M.A. e Grinspoon D.H., in «Le Scienze» n. 369, maggio 1999.

SOSTENIBILITÀ

L'ultima

Riusciremo a eliminare dall'atmosfera abbastanza CO_2 da rallentare o addirittura invertire il cambiamento climatico?

di Richard Conniff

I pozzi di iniezione alla centrale geotermica di Hellisheiði, in Islanda, immettono una soluzione salina nelle profondità del substrato roccioso, insieme con l'anidride carbonica estratta dall'aria.

Fotografie di Liz Tormes

speranza

IN BREVE

Per limitare il riscaldamento globale a 1,5 °C, durante questo secolo le nazioni dovranno eliminare dall'atmosfera della Terra 1000 miliardi di tonnellate di anidride carbonica già emessa.

Trovare la combinazione perfetta tra i metodi di cattura del carbonio sarà essenziale. I macchinari che estraggono CO_2 dall'aria potrebbero eliminare 250 miliardi di tonnellate entro il 2100. Ripiantando le foreste disboscate si potrebbe arrivare a 180 miliardi.

I costi netti vanno da 0 a 300 dollari per tonnellata. A meno che si sviluppino grandi mercati per usare la CO_2 catturata, il sostegno migliore a queste tecniche potrebbe basarsi su una carbon tax.

Richard Conniff è un premiato autore scientifico. Tra i suoi libri ricordiamo *Cercatori di specie: eroi e folli alla scoperta della natura* (La biblioteca delle scienze, «Le Scienze», Roma, 2011).

on molto tempo fa sembrava che per salvare il mondo dal cambiamento climatico bastasse ridurre le emissioni di gas serra: **sostituire i combustibili fossili con fonti energetiche pulite, rendere più efficienti le automobili e gli edifici, passare alle lampade LED, consumare meno carne e così via.**

Ancora nel 2005, addirittura l'Intergovernmental Panel on Climate Change riteneva che tagliare le emissioni e favorire le energie rinnovabili fosse la risposta giusta.

Ma la strategia non ha funzionato nel modo previsto: invece di diminuire, le emissioni globali sono aumentate. A quanto pare non basterà nemmeno ridurre a zero le emissioni nette annuali in tutto il mondo entro il 2050.

I climatologi sostengono che ora, per evitare la devastazione economica e ambientale, dovremo anche arrivare alle emissioni negative. Si tratta di rimuovere dall'atmosfera miliardi di tonnellate di anidride carbonica ogni anno. È come dire che non solo non possiamo più portare fuori la spazzatura, ma dobbiamo anche riprenderci quella che avevamo messo fuori da casa in passato.

Le emissioni negative su grande scala sono diventate «una necessità biofisica» per soddisfare gli obiettivi legati al cambiamento climatico, in base a uno studio del 2018 condotto da Jan C. Minx, del Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change, con sede in Germania. Capire come raggiungere questo obiettivo è una questione di «assoluta urgenza» – avvertono Minx e gli altri autori su «Environmental Research Letters» – se il mondo vuole limitare il riscaldamento a 1,5 gradi. Quasi ogni nazione ha sottoscritto questo obiettivo – con un aumento «ben al di sotto» dei 2 gradi – nell'ambito dell'accordo di Parigi del 2015 sul cambiamento climatico. Attualmente la temperatura è circa un grado sopra i livelli preindustriali. Ma sta aumentando di 0,2 gradi ogni dieci anni. In un rapporto speciale di ottobre 2018, l'Intergovernmental Panel on Climate Change ha avvertito che abbiamo solo 12 anni per agire se non vogliamo superare l'aumento di 1,5 gradi, il livello ritenuto dalla maggioranza degli scienziati il limite massimo per sperare di tutelare la vita più o meno come è oggi.

Restare sotto quella soglia richiede uno specifico «budget del carbonio»: una quantità totale di anidride carbonica che possiamo aggiungere in atmosfera senza spingere il riscaldamento oltre quella temperatura. Con le emissioni attuali – tra 40 e 50 miliardi di tonnellate per anno – nello scenario da 1,5 gradi «potrebbe essere rimasta solo la quantità di anidride carbonica emessa in cinque anni», sostengono Minx e i suoi coautori. In seguito, ogni tonnellata in più richiederebbe una sottrazione di pari valore. Il suo gruppo stima che entro il 2100 il mondo dovrà rimuovere dall'atmosfera tra 150 e oltre 1000 miliardi di tonnellate di CO_2: circa da 2 a 16 miliardi l'anno a partire dal 2050, con un netto aumento di questo numero verso la fine del secolo.

Per riuscirci, osservano Minx e il suo gruppo, dovremo cominciare a realizzare «varie centinaia» di impianti per la cattura e lo stoccaggio del carbonio ogni anno a partire dal 2030, tra appena una decina d'anni. Potrebbe trattarsi di adottare grandi macchinari per estrarre anidride carbonica dall'aria o di sviluppare centrali elettriche a biomassa, in cui bruciare alberi – coltivati a rotazione continua – in una struttura che catturi le emissioni e le invii in profondità per sotterrarle definitivamente. Opzioni più semplici sotto l'aspetto tecnico consisterebbero nel ripiantare le foreste tagliate o espandere quelle esistenti, migliorare i terreni agricoli e i pascoli in modo che possano trattenere più carbonio, e infine frantumare e spargere alcuni tipi di rocce che assorbono CO_2.

Tuttavia, molti metodi di cattura del carbonio con una tecnologia più sofisticata sono ancora nelle fasi iniziali dello sviluppo. Richiedono investimenti enormi a fronte di un rischio concreto di fallire e comportano forti effetti collaterali, tra cui la concorrenza per i terreni già usati per la produzione alimentare o come habitat di animali selvatici.

Ma, a quanto pare, puntare alla cattura del carbonio su vasta scala è l'unica possibilità. Quando nel 2017 Adrian E. Raftery, statistico dell'Università di Washington, e altri autori hanno pubblicato su «Nature Climate Change» uno studio che osservava le tendenze attuali – senza considerare le tecnologie per le emissioni negative – hanno scoperto che, a questo tasso, entro la fine del secolo potremo arrivare a un riscaldamento di 3,2 gradi, entro un intervallo da 2 a 4,9 gradi. In uno studio successivo pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», il climatologo della Texas A&M University Yangyang Xu ha definito «catastrofico» un riscaldamento superiore a 3 gradi, mentre uno di oltre 5 gradi porrebbe «minacce esistenziali alla maggioranza della popolazione umana».

Così supponiamo che, nel corso di questo secolo, servano 1000 miliardi di tonnellate di emissioni negative: in media 20 miliardi di tonnellate all'nno dal 2050 al 2100. Quale fetta di quella torta si potrebbe ottenere con ciascun metodo, e a che prezzo? Vista la concorrenza tra i metodi per alcune risorse, per esempio il terreno, qual è la migliore combinazione da adottare? E riusciremo a trovare la volontà politica di puntare alle emissioni di anidride carbonica negative, oltre a ridurre drasticamente quelle attuali?

Vento più pulito

Su una distesa di lava solidificata con massi e muschio, ai piedi delle colline appena fuori da Reykjavík, in Islanda, un macchinario grande come un garage per una sola auto aspira aria attraverso un filtro chimico che estrae l'anidride carbonica. È alimentato dal calore residuo della centrale geotermica adiacente e pompa la CO_2 catturata a oltre 700 metri di profondità, dove il gas reagisce con la

Il macchinario di Climeworks estrae anidride carbonica dall'atmosfera (*1*). Un iniettore dentro una cupola vicina (*2*) invia il gas a oltre 700 metri di profondità, dove reagisce con il substrato basaltico e forma carbonato, visibile sotto forma di macchie bianche in un campione di basalto carotato (*3*).

roccia basaltica e si trasforma in un minerale solido. Climeworks, una *start-up* svizzera, definisce questa attività il primo impianto al mondo per la cattura diretta dall'aria e lo stoccaggio dell'anidride carbonica. Ne sequestra solo 50 tonnellate all'anno.

Cattura diretta dall'aria e stoccaggio potrebbero essere la strada più lineare verso le emissioni negative: file di ventilatori catturerebbero CO_2 e la seppellirebbero. Secondo le previsioni degli scenari, entro fine secolo questa tecnologia potrebbe eliminare ogni anno tra 10 e 15 miliardi di tonnellate di anidride carbonica; alcuni esperti ipotizzano che si possa arrivare anche a 35 o 40 miliardi. È una prospettiva così allettante da fare temere a molti climatologi che possa presentare un rischio morale: le persone potrebbe pensare che intanto si possa rimandare la riduzione dei combustibili fossili, nella speranza che poi arrivi la salvezza tecnologica.

L'esame più completo dei metodi di rimozione – un altro studio del 2018 pubblicato su «Environmental Research Letters» – adotta una prospettiva più moderata. Con i colleghi del Mercator, Sabine Fuss ha esaminato costi, effetti collaterali, sostenibilità ambientale e altri fattori per prevedere il potenziale di cattura del carbonio con i sette principali metodi di rimozione. Secondo Fuss e gli altri autori, nel 2050 quel potenziale di cattura diretto dall'aria andrà solo dai 500 milioni ai 5 miliardi di tonnellate all'anno – per un totale di 25-250 miliardi in questo secolo – a un costo tra 100 e 300 dollari alla tonnellata. Per avere un termine di paragone, consideriamo che ognuna delle nostre auto in genere emette in un anno 4,6 tonnellate di anidride carbonica.

In effetti, la cattura dall'aria «non è una soluzione perfetta», spiega James S. Mulligan del Food, Forests, and Water Program del World Resources Institute. «Non è qualcosa di scintillante. Anzi, è piuttosto disgustoso. Ma ci serve». Alcuni ricercatori sostengono di poter portare il costo sotto i 100 dollari per tonnellata. Ma se i tempi per adottare questa soluzione su vasta scala sono anche solo vagamente simili agli oltre 60 anni che ci sono voluti all'energia solare per passare dai satelliti negli anni cinquanta all'ampia penetrazione attuale, secondo Minx «potrebbe essere troppo tardi».

Inoltre la cattura diretta dall'aria consuma quantità di energia enormi. Eliminare un milione di tonnellate di CO_2 all'anno richiederebbe una centrale elettrica con una produzione tra 300 e 500 megawatt, stando a Jennifer Wilcox, professore di ingegneria chimica al Worcester Polytechnic Institute. Se fosse una centrale a carbone, genererebbe più emissioni di quelle eliminate. Se l'energia provenisse da impianti solari o eolici, coprirebbero una superficie enorme che potrebbe già essere necessaria per l'agricoltura o la natura. Ed è ovvio che un milione di tonnellate sarebbe pressoché ininfluente sull'obiettivo di 20 miliardi di tonnellate all'anno.

Realizzare queste centrali oggi potrebbe essere fondamentale per sviluppare il *know-how* necessario per costruirne poi altre, molto più grandi ed efficienti, nel corso del secolo. «Ma se oggi si costruisse un impianto per la cattura diretta di 20 milioni di tonnellate sarebbe un investimento sbagliato», spiega Roger Aines, direttore scientifico del programma energetico del Lawrence Livermore National Laboratory. «Ci vorrebbe moltissima energia solare ed eolica, e avendone così tanta la cosa migliore da fare sarebbe immetterla nella rete elettrica ed eliminare una centrale a carbone». Evitare le nuove emissioni ha ancora la priorità assoluta.

Una gamma di soluzioni

Lo studio di Fuss non si limita a sommare il potenziale dei sette metodi per catturare il carbonio (*si veda il box alle pp. 50-51*), perché alcuni di loro si contendono le stesse risorse. Per esempio, troppa riforestazione porterebbe via il terreno necessario a fare crescere il combustibile delle centrali a biomassa, e troppa bioenergia potrebbe essere in concorrenza con la cattura diretta dall'aria per lo stoccaggio sotterraneo del carbonio. I climatologi sostengono che dobbiamo ottimizzare una gamma di metodi.

Secondo Pete Smith, professore di terreni e cambiamento glo-

Come si abbinano le strategie di cattura del carbonio

Quali tecniche potrebbero catturare più anidride carbonica nel 2050? Quanto costeranno? Il quadrato grande mette a confronto i vari approcci. I numeri provengono da una meta-analisi di numerosi studi, eseguita dall'economista Sabine Fuss e dai suoi colleghi. Ciascuno dei grafici più piccoli rappresenta una valutazione dettagliata da parte degli studi e il giudizio esperto del gruppo di Fuss.

B
Bioenergia con cattura e stoccaggio del carbonio

Le piante, che assorbono CO_2, sono bruciate per produrre energia, oppure fermentano producendo combustibile. La CO_2 è rimossa e pompata in profondità per essere stoccata definitivamente. I prodotti creano reddito, ma un'adozione su larga scala potrebbe consumare il terreno necessario per le coltivazioni alimentari.

A
Riforestazione e afforestazione

Si piantano alberi per sostituire le foreste abbattute o ampliare quelle esistenti. Gli alberi assorbono anidride carbonica dall'aria e poi la convertono nella crescita di nuovo legno, radici comprese. I mercati e le pratiche di gestione del legname dovrebbero essere riformati.

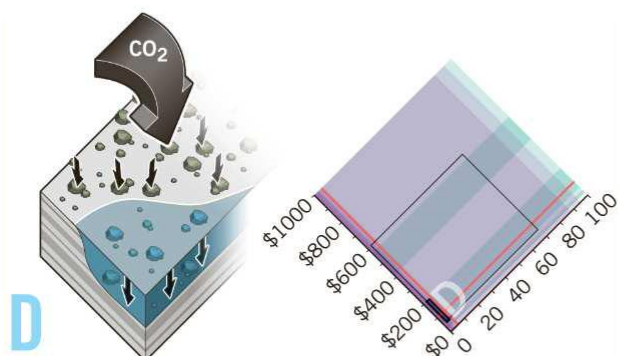
C
Biochar

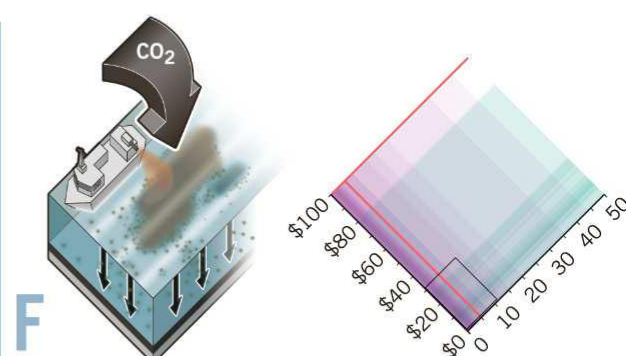
Piante, letame o rifiuti organici sono riscaldati senza ossigeno, in modo da creare biocarburante e biochar, un residuo simile al carbone vegetale, ricco di carbonio. Si sparge nei campi coltivati per migliorare il suolo, che si può legare ad altro carbonio. Produrre biochar su vasta scala con un minimo dispendio di energia potrebbe essere difficile.

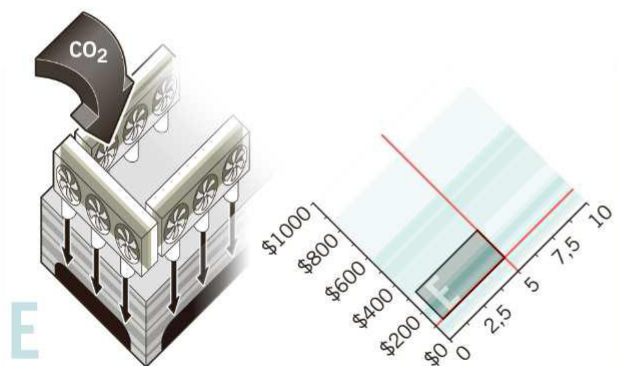
Grafici di Pitch Interactive, illustrazioni di Ben Gilliland

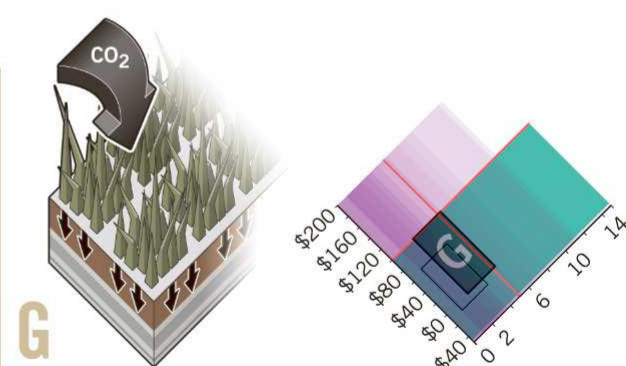
* «Potenziale fuoriuscita di CO_2» si riferisce allo stoccaggio sotterraneo.

Pro e contro

Le tecniche che cattureranno il carbonio nel 2050 (*righe*) potrebbero presentare effetti collaterali, positivi o negativi (*cerchi*). La colonna della «preparazione tecnica» esprime quanto un metodo potrebbe essere pronto per essere applicato in quel momento. La «permanenza» indica se la CO_2 stoccata può tornare nell'atmosfera: «reversibile» significa alto rischio, «stabile», basso rischio (*quadrati*). Le colonne più a destra (*triangoli*) illustrano se dopo il 2050 il potenziale di cattura o i costi aumenteranno o diminuiranno, in base ai fattori come la disponibilità limitata di terreno. Il giudizio sugli effetti rispecchia la valutazione che hanno ricevuto più spesso negli articoli pubblicati (se ce ne sono pochi, la relativa voce nella tabella è vuota).

Degradazione meteorica potenziata

La roccia è polverizzata. Quando è sparsa sui campi, attira l'anidride carbonica dall'aria e fertilizza il suolo. Quando è sparsa nell'oceano reagisce con l'acqua, convertendo la CO_2 in carbonati che si depositano sul fondo. È essenziale frantumare e trasportare la roccia in modo economico.

Fertilizzazione degli oceani

Si sparge in mare limatura di ferro, che stimola la crescita del plancton. La CO_2 è assorbita e trasformata in zucchero o materiale cellulare. Quando muoiono, gli organismi si depositano sul fondo. I vantaggi durerebbero poco e alterare l'ecosistema sarebbe rischioso, quindi gli esperti hanno escluso questa possibilità dal grafico complessivo (*pagina a fronte*).

Cattura diretta dall'aria

Macchinari aspirano l'aria circostante e ne estraggono tramite via chimica l'anidride carbonica, per stoccarla in modo permanente. I costi previsti sono elevati, tuttavia potrebbero diminuire con lo sviluppo della tecnologia. (I dati per il «potenziale» non erano disponibili.)

Stoccaggio del carbonio nel suolo

Erbe o piante coltivate assorbono CO_2 e la convertono in materiale per le radici, fissando il carbonio nel suolo. Le tecniche di gestione del terreno potrebbero migliorare la cattura e la resa delle piante. Il potenziale nel lungo periodo potrebbe essere ridotto, perché il suolo non può trattenere più di una certa quantità di carbonio.

Fonte: *Negative Emissions–Part 2: Costs, Potentials and Side Effects*, di S. Fuss e altri, in «Environmental Research Letters», Vol. 13, n. 6, articolo n. 063002, giugno 2018

bale all'Università di Aberdeen, in Scozia, un modo immediato per dare il via a questa gamma consiste nell'intensificare «ciò che sappiamo già fare. Sappiamo come piantare gli alberi. Sappiamo come ripristinare le torbiere, sostanzialmente alzando la falda acquifera», in modo che la torba catturi l'anidride carbonica invece di emetterla. «Sappiamo come migliorare il contenuto di carbonio nel suolo... Incentivare questo tipo di cose è relativamente facile e si potrebbe fare subito. Ci permetterebbe di fare passi avanti».

Pensiamo alla riforestazione. È una tragedia che le foreste tropicali non contribuiscano più a ridurre le emissioni di CO_2, bensì ad aumentarle, via via che si abbattono e bruciano gli alberi, o le foreste devastate subiscono il degrado. Riportare le foreste a essere fonte di emissioni negative richiederebbe per prima cosa ampie riforme nel mercato internazionale del legname, fortemente influenzato dal commercio illegale. A parte quello, il luogo più ovvio per la riforestazione è il terreno che era stato trasformato in campi o pascoli, ma poi abbandonato in quanto improduttivo. Secondo uno studio del 2015 pubblicato su «Nature Climate Change» da Richard Houghton, del Woods Hole Research Center, ripristinando 5 milioni di chilometri quadrati di questi terreni si potrebbero catturare 3,7 miliardi di tonnellate di anidride carbonica all'anno, se fossero disponibili fondi adeguati.

Se tutti i terreni a pascolo per il bestiame che prima erano foreste fossero riconvertiti, le emissioni negative arriverebbero addirittura a 10 miliardi di tonnellate all'anno, secondo Bronson Griscom, che nell'organizzazione The Nature Conservancy dirige il gruppo di scienza del carbonio forestale ed è l'autore principale di uno studio sulle «soluzioni climatiche naturali» pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences». È una buona parte del recupero di CO_2 necessario in un anno. Ma questa mossa richiederebbe una riduzione su scala globale del consumo di carne, cioè il contrario della tendenza attuale.

Quello che serve è un investimento massiccio in ricerca e sviluppo per tutti i metodi

Fuss e coautori prevedono un potenziale più contenuto. Gli alberi vivono e muoiono, perciò ora assorbono carbonio, ma lo emetteranno di nuovo verso la fine di questo secolo o nel prossimo. Inoltre la quantità di anidride carbonica catturata diminuirà probabilmente via via che le foreste matureranno, crescendo più lentamente. E i rischi sono accresciuti da incendi, deforestazione e cambiamento climatico. In ogni caso, l'espansione delle foreste potrebbe costituire una soluzione temporanea ma essenziale, via via che si diffonderanno la cattura diretta dall'aria o altre tecnologie. Fuss valuta il suo potenziale grosso modo tra 500 milioni e 3,6 miliardi di tonnellate di anidride carbonica in meno ogni anno, entro la metà del secolo. Così si potrebbero eliminare da 25 a 180 miliardi di tonnellate sui 1000 a cui puntiamo per la fine del secolo, a un costo da 5 a 50 dollari per tonnellata.

Una gestione migliore potrebbe aumentare i benefici. Per esempio, Griscom osserva che nel sud-est degli Stati Uniti i silvicoltori raccolgono deliberatamente gli alberi di pino rigido vari anni prima che raggiungano la resa massima. Se si permettesse loro di vendere crediti di carbonio per coprire gli anni di crescita extra, si potrebbe ritardare il raccolto fino al momento ideale, aumentando la quantità di legname e l'anidride carbonica stoccata.

Analogamente, far crescere nei pascoli piante che fissano l'azoto e farli ruotare in modo più intelligente potrebbe rendere i pascoli più produttivi, migliorando al tempo stesso lo stoccaggio del carbonio nei terreni. Secondo una stima prudente di Fuss, i miglioramenti del sequestro nel suolo possono rendere fino a 5,3 miliardi di tonnellate all'anno – 265 miliardi in questo secolo – a un prezzo da 0 a 100 dollari alla tonnellata.

E questo si aggiungerebbe al *biochar*. In questa forma di eliminazione del carbonio, una fornace specializzata applica calore a una biomassa in assenza di ossigeno, trasformandola in una specie di carbone vegetale e generando sottoprodotti utili, come bio-petrolio o gas sintetico. Quando il carbone vegetale è sparso nei campi, si lega al carbonio nel terreno e può migliorare la resa dei raccolti. Finora però nessuno ha provato a usare il biochar su ampia scala. Fuss e coautori ritengono plausibile che possa eliminare da 300 milioni a 2 miliardi di tonnellate all'anno di anidride carbonica, a un prezzo tra 90 e 120 dollari alla tonnellata. Sono 15-100 miliardi di tonnellate nel corso di questo secolo.

Un'altra soluzione basata sul terreno è la cosiddetta BECCS (bioenergia con cattura e stoccaggio del carbonio). Per rispettare gli impegni dell'accordo di Parigi, molti paesi hanno progetti iniziali basati su questo metodo, che però è molto controverso. Una centrale elettrica brucia legno, rifiuti agricoli o altre biomasse, come l'erba alta delle praterie. Queste fonti prelevano CO_2 dall'atmosfera via via che crescono o si accumulano. La combustione la emette di nuovo, e la centrale elettrica la ricattura dalla ciminiera, inviandola verso formazioni geologiche in profondità dove è stoccata definitivamente. Ma la riforestazione per produrre biocombustibili, nelle dimensioni indicate da alcuni sostenitori, potrebbe occupare gran parte del terreno arabile mondiale, minacciando la produzione alimentare e la conservazione della natura, oltre alla rimozione dell'anidride carbonica con altri metodi come la riforestazione o lo stoccaggio nel suolo. Inoltre estrarre emissioni dalla ciminiera riduce assai l'efficienza della centrale elettrica, almeno con le tecnologie attuali. Quindi Fuss valuta la resa sostenibile della BECCS solo 2 miliardi di tonnellate all'anno, un valore molto più basso delle previsioni di altri ricercatori, a un costo tra 100 e 200 dollari alla tonnellata. Secondo la stima di Fuss, si raggiungerebbero i 100 miliardi di tonnellate di emissioni negative entro il 2100.

Restano altri due metodi di cattura del carbonio in esame. La degradazione meteorica potenziata sfrutta un processo naturale: l'anidride carbonica nell'aria si trasforma in calcare quando entra in contatto con alcuni tipi di rocce frantumate. Si tratta di vedere se i ricercatori riusciranno a scoprire un modo economico per ridurre in polvere le rocce giuste e accelerare così il processo naturale. Fuss valuta il potenziale tra 2 e 4 miliardi di tonnellate all'anno, a un costo da 50 a 200 dollari alla tonnellata. Il suo gruppo conclude che la fertilizzazione degli oceani – spargervi ferro o altri nutrienti per stimolare la crescita di alghe e altro plancton, che assorbono CO_2 – sarebbe troppo inefficiente e di breve durata per giustificare i potenziali effetti negativi sugli ecosistemi. Scrivono: «Non è una strategia praticabile per le emissioni negative».

Più profitto che costo

A conti fatti, dove si arriva? La somma dei valori nello studio di Fuss può andare da soli 150 a poco più di 1000 miliardi di tonnellate entro il 2100. Si direbbe che in quest'ultimo caso si possa risolvere il problema. Ma non possiamo limitarci a sommare i numeri, dato che i vari metodi sono in competizione. Possiamo invece – spiega Fuss – gestirne la gamma in modo da sfruttare le loro sovrapposizioni vantaggiose. La degradazione meteorica potenzia-

Il fertilizzante biochar è stato realizzato riscaldando deiezioni di polli e trucioli che altrimenti durante la decomposizione emetterebbero anidride carbonica.

Jeff Hutchins/Getty Images

ta, per esempio, si potrebbe adottare sugli stessi terreni usati per far crescere le biomasse per la BECCS.

Quello che serve a tutti i metodi, sostengono gli scienziati, è un investimento massiccio in ricerca e sviluppo. «Sarà una battaglia lunga e difficile», dice Aines del Lawrence Livermore. Ma i governi si sono dimostrati riluttanti a pagare il conto delle tecnologie per le emissioni negative sia per una resistenza ideologica alla «scelta dei vincitori» sia perché in passato alcuni investimenti sono stati clamorosi insuccessi. Il Department of Energy statunitense, per esempio, ha speso tanto denaro in progetti di cattura del carbonio che puntavano a generare energia con il «carbone pulito». Nel 2017, Southern Company ha abbandonato l'ultimo tentativo, convertendo al gas naturale la centrale a carbone pulito nella contea di Kemper in Mississippi, dopo avere speso 7,5 miliardi di dollari.

Una *carbon tax* aggirerebbe la scelta dei vincitori grazie all'imposizione di un costo per le emissioni, cioè per lo scarico dei rifiuti in atmosfera. Così si creerebbe una motivazione commerciale sia per ridurre le emissioni attuali sia per riprendersi successivamente quelle passate. Il Regno Unito ha imposto una tassa di questo tipo, oggi intorno ai 25 dollari alla tonnellata, innanzitutto sulle centrali che bruciano combustibili fossili, e le emissioni dal carbone si sono dimezzate in un solo anno, dal 2015 al 2016. Molti governi però esitano all'idea di imporre una tassa che considerano troppo drastica per le economie basate sui combustibili fossili.

Tranne poche eccezioni, anche le aziende si sono dimostrate riluttanti a investire nelle tecnologie per eliminare CO_2 perché fino a poco tempo fa non vedevano un mercato. Dal loro punto di vista sistemare il clima è un vantaggio pubblico, non qualcosa da cui ricavare un profitto. Ma può darsi che questa situazione cambi, grazie a un pacchetto di incentivi fiscali approvato a inizio 2018 dal Congresso degli Stati Uniti, in modo stranamente bipartisan. La cosiddetta legislazione 45Q aumenta nettamente i crediti fiscali che le aziende potranno far valere nei prossimi 12 anni, non solo catturando CO_2 e stoccandola sottoterra, con crediti di 50 dollari alla tonnellata, ma anche usando la CO_2 in svariati modi.

L'uso più controverso è il recupero assistito del petrolio. Un'azienda petrolifera acquista CO_2, la trasporta via gasdotto e la inietta in pozzi esauriti, per ricavarne altro petrolio che non riuscirebbe a estrarre con metodi convenzionali. Una soluzione al cambiamento climatico che porti a produrre più combustibili fossili può sembrare un paradosso, e alcuni ambientalisti hanno attaccato la 45Q, sostenendo che nasconda un altro programma di sussidi ai combustibili fossili. Ma a quanto pare il recupero assistito del petrolio riduce le emissioni attuali, dato che la CO_2 catturata, proveniente in genere dalle raffinerie di gas naturale o etanolo, è stoccato sottoterra. Per alcuni ambientalisti, come Kurt Waltzer di Clean Air Task Force, trasformare la cattura del carbonio da una tecnologia delle emissioni a una tecnologia energetica è il primo passo per adottare commercialmente la rimozione di CO_2 su vasta scala: così la CO_2 ricatturata diventa un prodotto da vendere o comprare, invece che solo un costo di cui farsi carico. Potrebbe essere fondamentale per arrivare alle emissioni negative.

È ora di cominciare

Con una gamma di metodi per la cattura del carbonio, tasse e mercati, riusciremo a raggiungere l'obiettivo di 1000 miliardi di tonnellate entro il 2100? Forse l'estate torrida del 2018 è stata un punto di svolta. L'ovest degli Stati Uniti è andato a fuoco. In quattro continenti si sono registrate forti ondate di caldo. In Giappone, in una sola settimana migliaia di persone sono andate in ospedale per un colpo di calore. I climatologi si sono sbarazzati del linguaggio prudente e, sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», hanno avvertito che un ulteriore riscaldamento rischia di trasformare la Terra in un «pianeta serra... probabilmente incontrollabile e pericoloso per molti». Se quel messaggio non è stato abbastanza forte, l'illustre autore Hans Joachim Schellnhuber, direttore emerito dell'Istituto per la ricerca sull'impatto climatico di Potsdam, in Germania, ha dichiarato che gli effetti a catena potrebbero portare a un mondo in grado di sostenere solo un miliardo di persone, invece dei 7,5 attuali.

Per alcuni leader politici, ancora oggi il cambiamento climatico sembra avvolto nel mistero, nonostante le prove schiaccianti che costituisca il nostro sinistro presente e un ancora più sinistro futuro. L'aspetto sconcertante delle tecnologie per le emissioni negative è che molto appare incerto addirittura agli scienziati. «Tutti parlano di come dipenda da qual è il substrato, dalla parte del mondo in cui ci si trova, dalle precipitazioni in quel luogo e dalla temperatura», spiega l'ecologa Stephanie Roe, dell'Università della Virginia, a proposito del miglioramento del carbonio nel suolo.

Inoltre i ricercatori restano invischiati a discutere se qualcuno dei metodi per eliminare il carbonio, certo non tutti, possa crescere fino a miliardi di tonnellate all'anno. «Forse in questo dibattito c'è un po' troppa attenzione sulle cifre che si potranno raggiungere», dice Brendan Jordan, del Great Plains Institute di Minneapolis. «Temo che ci paralizzi, e non possiamo permetterci una paralisi». In altre parole, dobbiamo cominciare a raggiungere le emissioni negative nonostante le incertezze, perché sono insignificanti rispetto a un mondo in cui, quando il cambiamento climatico fermerà la musica, 6,5 miliardi di persone resteranno senza sedia. ■

PER APPROFONDIRE

Natural Climate Solutions. Griscom B.W. e altri, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 114, n. 44, pp. 11.645-11.650, 31 ottobre 2017.

Negative Emissions-Part 2: Costs, Potentials and Side Effects. Fuss S. e altri, in «Environmental Research Letters», Vol. 13, n. 6, articolo n. 063002, giugno 2018.

Technological Carbon Removal in the United States. J. Mulligan e altri, World Resources Institute, settembre 2018.

L'illusione della cattura del carbonio. Biello D., in «Le Scienze» n. 571, marzo 2016.

BIOLOGIA

Fantasmi di fiori

I geni di una pianta estinta da oltre un secolo sono stati riportati indietro dal regno dei morti. Oggi possiamo di nuovo sentirne i profumi

di Rowan Jacobsen

Fotografie di Floto + Warner

Ripescate dal baratro. *Leucadendron grandiflorum*, un arbusto sudafricano (*a sinistra*), si è estinto nel 1806, e lo stesso è avvenuto all'ibisco di montagna di Maui nel 1912. Ma il loro DNA è stato recuperato, alcuni geni per i profumi sono stati rigenerati e ora stanno di nuovo producendo fragranze. L'ibisco, di cui dopo più un secolo qualcuno è tornato a sentire il profumo, sa di corteccia e ginepro, con note di cedro e di timo.

Rowan Jacobsen, giornalista, ha scritto libri, fra cui *Shadows on the Gulf* (Bloomsbury, 2011) e *The Essential Oyster* (Bloomsbury, 2016), e numerosi articoli apparsi su riviste. È stato Knight Science Journalism Fellow al Massachusetts Institute of Technology nel 2017-2018.

Nel 1912, sugli antichi campi di lava del vulcano Haleakalā di Maui, una delle isole Hawaii, c'era un albero isolato che stava morendo. Alto quattro metri e mezzo, la corteccia incrostata di licheni, era ridotto al suo ultimo fiore.

Gli hawaiani lo chiamavano *hau kuahiwi*, ibisco di montagna. A differenza del più familiare ibisco hawaiano, che vive nelle valli umide e si apre in un *aloha* di benvenuto, l'ibisco di montagna cresceva solo sui campi lavici asciutti e ben drenati dei vulcani delle Hawaii. Il fiore dispiegava due soli petali dei cinque tipici degli ibischi; gli altri si richiudevano in un timido tubo incurvato, fatto su misura per uccelli canterini dal becco ricurvo tipici di Maui che si nutrivano del suo nettare: i suoi impollinatori preferiti.

Ma quell'albero non si riproduceva da anni. Gli uccelli erano in gran parte svaniti nel passaggio dal XIX al XX secolo, quando i campi di lava dello Haleakalā erano stati trasformati in allevamenti per bovini. Grattandosi, i bovini spogliavano il suo tronco dalla corteccia. I ratti divoravano i suoi semi.

Un botanico, camicia cachi e cappello di cuoio, risalì il pendio, con una borsa a tracolla. Si chiamava Gerrit Wilder ed era già stato lì nel 1910, con la spedizione che aveva identificato per la prima volta l'albero; in suo onore, era stato chiamato *Hibiscadelphus wilderianus*. Restò l'unico esemplare mai scoperto di quella specie, e le cui condizioni terminali erano il motivo del ritorno di Wilder. Il botanico raccolse l'ultimo fiore, qualche ramoscello e foglia, e li sistemò nella borsa. Poi si voltò e ridiscese il pendio.

Non passò molto tempo prima che l'albero soccombesse ai bovini e ai ratti, e perdesse le ultime foglie. *H. wilderianus* si era estinto. Fine della storia, si direbbe: dall'estinzione non c'è ritorno.

I recenti progressi nel sequenziamento del DNA, però, hanno reso sempre più facile leggere i geni di organismi morti da tempo e «riavviare» tratti del loro DNA. Sono in corso tentativi seri di usare queste tecniche per riportare in vita il piccione migratore e il mammut lanoso. Entrambi i progetti hanno bisogno di progressi della bioingegneria che richiederanno ancora anni. Ma intanto in un laboratorio all'ottavo piano di un edificio affacciato sul fiorente Seaport District di Boston è tornata in vita una parte essenziale di quell'ibisco di montagna da tempo perduto.

Un gruppo di ingegneri genetici, lavorando per la Ginkgo Bioworks, ha ricreato i geni degli aromi del fiore. Gli scienziati hanno ricostruito il materiale genetico a cui era dovuto il profumo particolare di quei fiori; lo hanno fatto funzionare in un'altra forma di vita (un lievito); e nasi umani hanno sentito l'odore di qualcosa che era svanito da questo pianeta oltre un secolo fa. Come quando Ulisse è sceso nell'Ade per chiedere informazioni ai defunti, c'è stata qualche comunicazione tra vivi e morti.

Non c'erano fiori e petali; ma quelle erano le sequenze di DNA della pianta che dicevano alle cellule di produrre molecole come facevano a Maui, e le molecole entravano nei nasi delle persone, inviando segnali al loro cervello. Finora è stato il segno più tangibile del fatto che la barriera invalicabile dell'estinzione comincia a indebolirsi. Questa nuova permeabilità impone una domanda bizzarra: possiamo riavviare abbastanza geni da poter dire che qualcosa non è più morta del tutto?

Il profumo della vita

Curiosamente, il progetto di questa rinascita è iniziato nel 2014 a Roma, alla fiera annuale dell'International Federation of Essential Oils and Aroma Trade, dove Jason Kelly, CEO di Ginkgo, era andato per trovare clienti. Nel 2008 Kelly e gli altri fondatori di Ginkgo erano stati tra i primi al Massachusetts Institute of Technology a conseguire un PhD in biologia sintetica. Anche la loro azienda è altamente specializzata: se un'altra azienda ha bisogno di un nuovo microrganismo che produca qualche molecola di valore – per carburanti, fibre, fragranze, prodotti farmaceutici o altro – Ginkgo progetterà e testerà centinaia di prototipi nelle sue «biofonderie», e consegnerà quelli che funzionano meglio.

Molti dei migliori clienti della Ginkgo sono dell'industria dei profumi e delle fragranze, in cui certi ingredienti possono avere prezzi astronomici. Quelle molecole odorose sono prodotte in cellule vegetali da enzimi, e le istruzioni per fabbricare i relativi enzimi sono codificate nel DNA da un gene. Come quelli dei computer, anche questi «programmi» possono «girare» su ogni piattaforma compatibile; e, quanto a piattaforme, la vita è sorprendentemente agnostica. Tutto ciò che vive usa la stessa lingua, fatta delle quattro lettere del DNA (i componenti indicati con A, T, C e G); e molti geni che girano in lieviti e piante sono gli stessi. Inserendo i geni per le fragranze in ceppi di lievito di birra appositamente ingegnerizzati, Ginkgo produce molecole odorose in recipienti di fermentazione, come appunto nella produzione della birra.

Alla fiera, Kelly aveva conosciuto un consulente di Givaudan, il

IN BREVE

La morte è morte, era il dogma dell'estinzione: una volta estinta, una specie è scomparsa definitivamente dal mondo.

Però è possibile far rivivere i geni dei morti. Un gruppo di scienziati lo ha dimostrato recuperando DNA e facendolo funzionare di nuovo.

Così sono stati recuperati geni che codificano per i profumi di fiori scomparsi da tempo, e i ricercatori ne hanno odorato i prodotti.

Geni recuperati: alcuni ricercatori hanno trovato DNA ridotto in frammenti in esemplari di piante estinte custoditi negli erbari di Harvard; poi hanno rimesso insieme i frammenti, ricostruendo così geni che codificavano per fragranze in *Leucadendron grandiflorum* Salisb. (*1*); ibisco di montagna (*Hibiscadelphus wilderianus* Rock) (*2*); *Orbexilum stipulatum* (Torr. & A. Gray), Rydb. (*3*). Queste tre piante hanno prodotto composti odorosi. Un tipo di mirto, *Myrcia skeldingii* Proctor (*4*), ha dato un gene che non ha prodotto molecole odorose.

Gli esemplari sono stati fotografati all'erbario dell'Arnold Arboretum e al Gray Herbarium dell'Harvard University

gigante svizzero dei profumi, che gli aveva parlato del programma Scent Trek, che inviava esploratori nelle foreste pluviali di tutto il mondo a campionare l'aria intorno ai fiori più rari per identificarne i profumi. Kelly era rimasto affascinato. Se avesse avuto campioni di quelle piante, Ginkgo avrebbe potuto sequenziarne i geni e sintetizzare gli enzimi che fabbricavano gli aromi. Ma mentre i due si scambiavano idee, Kelly ne aveva avuta una più folle. E se fosse riuscito ad andare oltre le piante oggi conosciute, fino a riportare indietro i profumi di fiori che non esistono più?

Sarebbe il primo passo, aveva pensato, per invertire il corso di un enorme spreco biologico. «Questo pianeta ha passato 3 miliardi di anni a provare tante diverse sequenze di DNA nel processo che noi chiamiamo evoluzione – dice Kelly – e quello che abbiamo ora è il risultato. Ma lungo la strada si è persa un sacco di roba per motivi casuali – un meteorite, o chissà che altro – e lì in mezzo c'erano cose incredibili. Il pianeta ci ha messo centinaia di milioni di anni a far evolvere quel DNA. E noi dovremmo rinunciarci e basta? Per un biologo sintetico è frustrante immaginare di dover perdere tante magnifiche sequenze».

Il programma iniziale era una variazione sul tema di *Jurassic Park*. Trovare un fiore dell'era glaciale nel permafrost dell'Artico, sequenziarne i geni, sintetizzare quelli a cui si deve il profumo e poi inserirli nelle cellule di lievito. I geni avrebbero istruito le cellule a produrre le molecole odorose, e Kelly avrebbe potuto presentare una fialetta di Extinction n. 5.

Era un azzardo. Qualche gene antico era stato ricostruito in laboratorio, ma la maggior parte se ne stava lì, nessuno aveva mai chiesto loro di produrre una proteina e tornare nel nostro mondo. Se anche Ginkgo fosse riuscita a ricostruirli, non era detto che poi quei vecchi geni funzionassero nel lievito di oggi. In più, c'era la questione delle risorse da impegnare: in azienda tutti avevano già fin troppo da fare. L'ultima cosa di cui avevano bisogno era farsi risucchiare in *Jurassic Park*.

Ma il progetto aveva trovato un'accesa sostenitrice in Christina Agapakis, *creative director* di Ginkgo. Agapakis aveva conseguito il PhD in biologia sintetica alla Harvard University, lavorava all'ottimizzazione di batteri per la produzione di idrogeno da usare come carburante e realizzava opere d'arte basate sulle forme degli anticorpi. Spiritosa e comunicativa, Agapakis era attirata dalla ricerca nei territori di confine tra naturale e innaturale, stimolando conversazioni interessanti sugli organismi geneticamente modificati. Un profumo di fiori estinti da odorare meditando sulle specie perdute era in linea con i suoi interessi. Agapakis aveva chiamato la sua iniziativa «Progetto Cretaceo» (Project Cretaceous), il periodo in cui nacquero i primi fiori; aveva iniziato contattando esperti di scavi dell'era glaciale, che le avevano detto che era impossibile sequenziare genomi partendo dalle particelle vegetali appiccicose che emergono dal permafrost. L'era glaciale era un vicolo cieco.

Prima di arrendersi, Agapakis, da brava *millennial*, aveva cercato su Google «sequenziamento DNA piante estinte». In fondo alla lista dei risultati aveva trovato un oscuro articolo del «Biological Journal of the Linnean Society» sulla «museomica», una nuova tecnica per estrarre DNA dai campioni di piante e animali conservati nei musei. Dopotutto, quindi, non aveva bisogno del permafrost: le bastava un erbario.

Laureatasi ad Harvard, sorrise. Sapeva benissimo dove trovarlo.

In cerca di DNA

Gli erbari della Harvard University, che risalgono al 1842, si trovano in un edificio in mattoni al termine di una strada chiamata Divinity Avenue, e i suoi tanti piani sono pieni di armadietti che odorano di formaldeide e conservano oltre 5 milioni di esemplari. Non si entusiasmano per i cambiamenti, così quando Agapakis nel 2016 aveva esposto il suo piano il curatore si era mostrato scettico. *Che cosa* voleva fare con le loro piante? Gli erbari non servivano certo a dar via le collezioni ad aziende in cerca di profitti. Inoltre non avevano una banca dati in cui cercare gli esemplari che possedevano, quindi non avevano idea se ci fossero o meno piante estinte.

Agapakis aveva impiegato mesi in trattative e l'accordo era stato chiuso quando si era offerta di mettere a disposizione della comunità scientifica tutti i genomi di piante estinte eventualmente trovati. Anche così, le piante doveva trovarsele da sola, senza l'aiuto del personale dell'erbario, e se ci fosse riuscita avrebbe potuto prelevare solo un frammento di materiale irrilevante grande quanto l'unghia di un mignolo.

Insieme a Dawn Thompson, capo della sezione Next Generation Sequencing di Ginkgo, Agapakis aveva stampato l'elenco delle 116 piante estintesi in tempi recenti, citate nella Lista Rossa dell'International Union for Conservation of Nature (IUCN), poi era partita alla ricerca. La collezione era organizzata prima per famiglie vegetali, poi per aree geografiche: quindi il solo modo per trovare un esemplare era andare al piano giusto degli erbari, trovare il corridoio dedicato alla famiglia cercata e poi guardare in tutte le cartelline relative alla regione o al paese in questione. I corridoi erano interminabili, gli armadi sembravano traboccare di piante d'ogni genere tranne quelle che cercavano. Poi, a un certo punto, nella sala dedicata alle Hawaii, Agapakis ha fatto girare una grossa ruota per allontanare gli armadietti l'uno dall'altro fra gli scricchiolii del legno, ha aperto le porte, ha sfogliato le cartelle, ne ha aperta una e ha posato gli occhi su tre lunghi ramoscelli con una serie di belle foglie larghe e un unico bocciolo. «Flora delle Isole Hawaii», recitava il cartellino. «*Hibiscadelphus wilderianus*». Agapakis ha provato un brivido di eccitazione. Era l'albero estinto di Wilder, proprio davanti a lei.

Alla fine, negli erbari gli scienziati di Ginkgo avevano trovato 20 delle piante della lista, e per 14 c'era materiale sufficiente. Sotto gli occhi diffidenti del curatore ne avevano staccato i pezzetti meno importanti per metterli in bustine di plastica e portarli via.

Qui iniziava la parte difficile. Dopo la morte dell'organismo, il DNA si degrada: Ginkgo cercava aghi di DNA in grandi pagliai di cellulosa. E il materiale che aveva bastava giusto per qualche tentativo. I ricercatori avevano deciso di esercitarsi su una foglia di quercia raccolta per strada a Boston. Ma non era andata bene. Malgrado attrezzature d'avanguardia, avevano faticato a estrarre il DNA dai campioni. E da quelli antichi non avevano nulla.

Vista anche la crescente pressione affinché restituissero il se-

«Il pianeta ha fatto evolvere il DNA per centinaia di milioni di anni. E noi dovremmo rinunciarci e basta? Per un biologo sintetico è frustrante»
Jason Kelly, Ginkgo Bioworks

RITORNO DAL PASSATO
La via della rinascita
Per riportare indietro i geni dal regno dei morti non basta trovare il DNA antico. Il materiale genetico deve essere ripristinato a dare un gene funzionale che istruisca le cellule a sintetizzare molecole. Poi il gene – che in questo caso viene da una pianta hawaiana estinta, l'ibisco di montagna – deve essere inserito in un nuovo ospite, vivo. I ricercatori di Ginkgo Bioworks hanno inserito il gene nel lievito, dove ha effettivamente prodotto composti odorosi.
Foglia essiccata di *Hibiscadelphus wilderianus*
1 Da campioni essiccati di piante i ricercatori estraggono piccoli frammenti di DNA.
2 I frammenti sono analizzati in un sequenziatore, che determina l'ordine dei nucleotidi di cui è composto (indicati con A, T, C e G)
Frammenti di DNA
Sequenziatore
AAATCGGGGCTAG
GAT
CACGATT
AGGCCA
TAG
Gene per SQS tratto da un organismo imparentato, che fa da modello
3 Il gene che si vuole ricreare è quello per una sesquiterpene sintasi (SQS), l'enzima che assembla la maggior parte delle molecole odorose dei fiori. Gli scienziati prendono le sequenze antiche e ne trovano alcune che corrispondono a parti di una sequenza SQS in base a un gene di un organismo di oggi. La sequenza vivente fa da modello per determinare le posizioni di ciascun frammento.
Mancata corrispondenza
La sequenza modello aiuta a determinare quali frammenti di DNA vanno accostati fra loro e se ci sono posizioni in cui i nucleotidi non corrispondono.
Le sezioni mancanti tra un frammento e l'altro sono integrate con le sequenze del modello.
Gene per una SQS dell'ibisco di montagna, ricostruito
GAGGCCAAATCGGGGCTAGTCACGATTCCTGATG
4 La sequenza ricostruita è convertita in molecola fisica con una stampante a DNA, che costruisce un tratto di DNA un elemento alla volta. Il prodotto finale è un gene per una SQS.
Stampante a DNA
Nucleo
Cellula di lievito
Gene trasferito al lievito
Gene per una SQS stampato
5 Il gene è inserito in un lievito «ospite», ingegnerizzato in modo da accettarlo, e le colonie di lievito sono fatte crescere in pozzetti. Le istruzioni codificate nel gene per la SQS dicono al lievito di fabbricare una molecola odorosa, proprio come facevano un tempo per l'antico ibisco.
Molecola odorosa
Illustrazione di Rebecca Konte

quenziatore a progetti paganti, Agapakis e Thompson si erano confrontate ed erano tornate con i piedi per terra. Se avessero continuato a provare, si sarebbero ritrovate senza più materiale vegetale, e non avevano modo di procurarsene altro. Così avevano deciso di mettere in pausa il progetto fino a quando non avessero trovare un modo più valido per realizzarlo.

Mesi dopo, a un convegno, Kelly ha incontrato Beth Shapiro, condirettore del Paleogenomics Lab dell'Università della California a Santa Cruz. Questo è il posto dove andare se volete recuperare dall'estinzione un mammut o un piccione migratore. Anno per anno, Shapiro e colleghi diventano sempre più bravi nell'estrarre quantità minime di DNA da materiale antico di bassa qualità. Nel 2016 il laboratorio è riuscito a identificare tra lo 0,01 e lo 0,005 per cento di DNA di mammut in sedimenti lacustri vecchi di 5650 anni provenienti da un'isola dello stretto di Bering. Al convegno, Shapiro aveva detto di spedirle i fiori.

Così Thompson ha spedito le sue bustine di materiale fogliare a Joseph Kapp, dottorando al Paleogenomics Lab, il quale ha iniziato a polverizzare i campioni per massimizzarne l'area superficiale, ma le piante non erano facili da ridurre in polvere come avveniva con le ossa a cui era abituato. Dopo passaggi di filtrazione, però, e l'uso creativo di composti che si legano ai frammenti di DNA, Kapp è riuscito a mettere i segreti di quelle piante perdute in 14 provette; le ha imballate in ghiaccio secco e spedite a Ginkgo. Quando Thompson ha messo i campioni nel sequenziatore, ha letto con entusiasmo molte sequenze brevi: milioni di frammenti genomici, di appena 40 o 50 lettere ognuno.

Spesso qualche piccolo cambiamento non influisce sul prodotto finale. A volte, anzi, geni di forma significativamente diversa funzionano in modo simile

La ricostruzione

Tra quei frammenti ce n'era qualcuno che apparteneva a un gene degli odori, ed era possibile rimetterli insieme? Ginkgo cercava geni lunghi 1700 lettere, che codificano per enzimi detti sesquiterpene sintasi (SQS); questi enzimi cuciono insieme la maggior parte delle molecole odorose dei fiori e in genere un fiore potrebbe avere tanti di questi geni. Con tutti i piccoli frammenti che avevano recuperato, era come se i ricercatori avessero un libro per ogni pianta, il genoma della pianta estinta, spezzettato a caso in tanti frammenti di 50 lettere mischiati insieme, e dovessero riassemblare nel modo giusto un certo numero di brani di 1700 caratteri.

Se avessero avuto copie dei testi di partenza come riferimento, o solo qualche capitolo, gli scienziati avrebbero potuto capire dove sistemare ogni frammento. Qui l'evoluzione è arrivata in soccorso. Non inventa mai nulla da zero: le nuove specie si evolvono dalle vecchie, modificando o convertendo a nuovi usi i geni presenti. Dunque i geni che codificano per le SQS delle piante attuali condividono parecchio codice del DNA con le antenate strettamente imparentate. Jue Wang, biologo computazionale alla Gingko, doveva risolvere il problema di rimettere insieme questi «testi» e aveva capito che poteva usare le moderne SQS come riferimento. Era un po' come cercare di ricostruire una versione perduta della Bibbia usando versioni esistenti come guide. Le parole potrebbero non essere esattamente le stesse, ma comunque sarebbero un'accettabile riferimento per capire dove mettere i frammenti.

Un pezzo per volta, Wang ha costruito i suoi geni sull'impalcatura offerta dalle specie imparentate viventi, disponendo i frammenti sulla base delle sovrapposizioni delle sequenze. Poi ha dedotto le lettere mancanti dalle sequenze attuali. Se un frammento dice: «In pr-nci--o era il V--rbo», si può guardare nella Bibbia della CEI con la ragionevole fiducia di trovare quel che manca.

Alla fine Wang ha ricostruito 2738 versioni di geni dei fiori estinti. Indubbiamente queste serie di lettere biologiche avevano qualche refuso. Ma i refusi avrebbero rovinato la funzione dei geni? A volte una sola lettera sbagliata in una sequenza di DNA può compromettere un gene con esiti catastrofici, come nell'anemia a cellule falciformi. Ma spesso qualche piccolo cambiamento non influisce sul prodotto finale. A volte, anzi, geni di forma significativamente diversa funzionano in modo simile.

Per tornare al Vangelo di Giovanni, «In principio era il Verbo» (Bibbia CEI 2008) e «In principio, c'era colui che è "la Parola"» (Bibbia TILC) non sono uguali lettera per lettera, ma trasmettono entrambi il concetto. Wang pensava che le sue sequenze fossero per la maggior parte troppo imprecise, ma sperava che qualcuna potesse funzionare e dare istruzioni a una cellula reale.

Per raggiungere l'obiettivo, quei geni, che esistevano solo nel computer di Wang, dovevano essere convertiti in DNA fisico. Questo è un compito piuttosto semplice: si fa con una «stampante» di DNA che somiglia a una stampante 3-D ma lega chimicamente nucleotidi A, C, G e T per costruire una classica doppia elica. Spesso è chiamato DNA sintetico, ma è DNA come tutti gli altri: una molecola è una molecola.

Ora toccava al lievito: ognuno degli oltre 2000 geni era stato inserito in una colonia coltivata in modo da accettare DNA estraneo e sintetizzare molecole secondo le istruzioni. Per giorni le colonie avevano prodotto schiuma nei loro contenitori, come nei tini in cui si fa la birra. Scott Marr, microbiologo molecolare di Ginkgo, aveva osservato i contenitori, chiedendosi che cosa sarebbe uscito. Finita la fermentazione, aveva esaminato un campione di ciascuna colonia con uno spettrometro di massa, usandolo come naso artificiale capace di rilevare e identificare i minimi quantitativi di molecole prodotte in ogni ceppo. A seconda della massa, le molecole danno picchi di diversa altezza su un grafico. Marr doveva leggere gli andamenti dei picchi, come tante impronte digitali.

Aveva scritto programmi per eliminare dai risultati tutti i normali prodotti metabolici del lievito, in modo che fossero mostrati solo i prodotti delle SQS estranee al lievito: i sesquiterpeni dei profumi. Consapevole delle probabilità di errori e delle poche possibilità di successo nelle traduzioni di Ginkgo, Marr aveva incrociato le dita e iniziato le analisi. I risultati però non mostravano nulla. Nei brani del libro rimessi insieme sembravano esserci troppi errori, paragrafi che le cellule non riuscivano a leggere.

Ma poi, eccolo lì: un picco. Dopo un po' un altro, e poi un altro ancora. Marr aveva ripreso a respirare e aveva iniziato a cercare le impronte digitali delle molecole nella sua banca dati di terpeni. In seguito avrebbe dato la buona notizia alla squadra del progetto: decine di chimere fiore-lievito erano vive.

Seduta al tavolo, Agapakis ha ascoltato il resoconto di Marr. Erano passati tre anni da quella prima pazza idea. Molte volte lei e i suoi colleghi erano stati sul punto di mollare. Ora avevano le molecole, codificate da geni che non esistevano più da un secolo.

1

2

3

Sala di de-estinzione: alla Ginkgo Bioworks di Boston, un laboratorio (1) è dedicato all'ingegnerizzazione del lievito affinché produca molecole estranee al lievito stesso, come i composti odorosi di piante estinte. Nel laboratorio, una ricercatrice (*2*) prepara cellule per l'analisi delle loro sequenze genetiche. Infine Christina Agapakis, che ha diretto il progetto di «rivitalizzazione» dei geni (*3*), annusa miscele dei diversi composti che hanno avuto origine dal DNA recuperato dall'ibisco di montagna estinto.

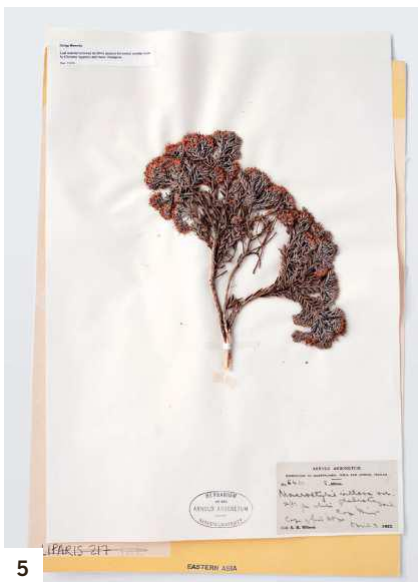
1

2

3

4

5

6

Progetto Cretaceo: nell'impresa di Ginkgo, che ha preso il nome dal periodo Cretaceo, sono stati ricreati geni per molecole odorose di 14 piante estinte (o quasi). Queste otto hanno dato sequenze promettenti di DNA, che però una volta inserite nel lievito ingegnerizzato non hanno prodotto composto odorosi: *Erica pyramidalis* Sol. (*1*), *Crassula subulata* var. *subulata* L. (*2*), *Nesiota elliptica* (Roxb.) Hook. f. (*3*), *Pradosia glaziovii* (Pierre) T. D. Penn. (*4*), *Macrostylis villosa* (Thunb.) Sond. (*5*), *Shorea cuspidata* P. S. Ashton (*6*), *Stenocarpus dumbeensis* Guillaumin (*7*) e *Thamnea depressa* Oliv. (*8*).

7

8

Ritorno alla realtà

I lieviti di Ginkgo sono riusciti a produrre sesquiterpeni da tre diverse piante estinte. Le quantità erano insufficienti per percepirli come odori direttamente, ma gli scienziati avevano un'idea di quali potessero essere i profumi dei fiori, in base a quelli delle loro controparti viventi. Una delle piante, *Orbexilum stipulatum* – un legume che fece l'errore fatale di crescere solo su alcuni isolotti rocciosi del fiume Ohio, tutte sommerse dalle dighe costruite negli anni venti – produceva una serie di sesquiterpeni che, in base a quello che possiamo ricavare dalle sue parenti del XXI secolo, dovevano avere un sentore legnoso, pepato e balsamico.

Leucadendron grandiflorum – un fiore alto un metro e mezzo dai petali bianchi e la testa gialla che è cresciuto sulle colline di granito sopra Città del Capo fino al 1806, quando è scomparso per sempre a causa dell'espansione delle vigne in Sudafrica – ha prodotto addirittura 21 sesquiterpeni, molti dei quali associati a profumi assai stimolanti: gelsomino, citronella, canapa, camomilla, curcuma, zenzero, luppolo. Una curiosa miscela, che non pare sbagliata per un fiore noto per avere un «odore forte e sgradevole».

Undici sesquiterpeni sono stati ottenuti da *H. wilderianus,* l'ibisco di montagna che aveva rilasciato la sua essenza al mondo per l'ultima volta nel 1912, quando Wilder ne aveva raccolto l'ultimo fiore ed era sceso dallo Haleakalā senza certo aspettarsi che qualcuno avrebbe sentito di nuovo il profumo dello *hau kuahiwi*. Da lì, l'improbabile cammino di una strana rinascita aveva portato ai geni all'erbario del College of Hawaii, dove la pianta era stata essiccata e pressata, e poi condivisa con gli erbari di Harvard. Ad Harvard ha aspettato decenni, finché un giorno Agapakis non ha aperto la sua cartella e prelevato un pezzetto dei suoi resti. I geni sono stati solubilizzati a Santa Cruz, digitalizzati a Boston e poi rianimati nel tenero abbraccio di un organismo diverso da quello che ne aveva ospitato l'ultima apparizione sulla Terra. Avevano attraversato il tempo e lo spazio cambiando più volte forma fisica, ma l'informazione era rimasta.

Grazie a questo lavoro, siamo un po' più vicini a tirar fuori da qualche cellula l'odore della tigre dai denti a sciabola o l'emoglobina dei Neanderthal

E poi è venuto il tempo di sentire i profumi. Il Progetto Cretaceo ha scelto di cominciare con *Hibiscadelphus*, sensibile forse alla stessa *allure* che per millenni aveva richiamato tanti uccelli nettarivori. In un luminoso giorno d'agosto, in un'impeccabile sala riunioni tutta bianca, il gruppo si è riunito a saggiare una serie di formulazioni – create per l'azienda da Sissel Tolaas, un'artista di profumi di Berlino – che miscelavano le molecole venute dalle Hawaii in combinazioni e concentrazioni diverse. Una delle molecole, la canfora di ginepro, è un prezioso ingrediente degli oli fraganti. *Hibiscadelphus* aveva gusti costosi.

I ricercatori hanno immerso le striscioline di carta che si usano per provare le fragranze in 11 fialette, le hanno tenute a qualche centimetro dal naso e hanno annusato dolcemente. Si sorridevano l'un l'altro, quasi non riuscissero a credere di essere davvero lì. «La prima fragranza rinata!», ha annunciato Kelly. La reazione di Agapakis è stata più immediata. «Mi sento sopraffatta», ha detto. «Non avevo idea di come potessero essere questi profumi».

In alcuni campioni c'erano lampi di cedro o timo. In tutti, si sentiva un nucleo legnoso di corteccia e ginepro, che deve essere stata l'essenza di *hau kuahiwi*. «Mi piace questa leggerezza», ha detto Agapakis, inalando a occhi chiusi. «Dà una sensazione eterea».

Sullo sfondo di molti campioni c'era un sulfureo sentore di fumo e detriti. A Kelly, odorandone uno, sono brillati gli occhi. «È qualcosa di magico», ha detto. «Spero che colpisca l'immaginazione e spinga le persone a pensare a tutto quello che abbiamo perso».

Il profumo, e i pensieri che ispira, segna una tappa importante, dice Megan Palmer, bioingegnera della Stanford University e consigliera di amministrazione di Revive & Restore, un'organizzazione no profit che sostiene i progetti di rinascita del mammut lanoso e del piccione migratore. «Non possiamo sapere quale fosse l'esatto profumo di quelle specie – dice – ma possiamo trovare indizi molecolari da interpretare tramite ciò che sappiamo sulle specie di oggi.» Viste come progressi scientifici, aggiunge, «queste tecniche possono aiutarci a ipotizzare meglio come funzionavano le specie estinte. E potrebbero anche permettere progetti più ambiziosi per il ripristino di queste funzioni e delle specie in cui sono emerse».

Grazie a questo lavoro, siamo un po' più vicini a far uscire da qualche cellula l'odore della tigre dai denti a sciabola o l'emoglobina dei Neanderthal. E via via che questi geni ormai autonomi tornano a funzionare in nuove forme, in numero sempre più grande, ci fanno mettere in discussione l'importanza che diamo all'idea di specie. Questo tradizionale contenitore genetico potrebbe non limitare la vita dei suoi contenuti. In quella sala riunioni di Boston, sembrava chiaro che era iniziato uno dei momenti più ricchi di opportunità della carriera del DNA, che dura da 4 miliardi di anni. Un nuovo ambiente, fatto di laboratori di bioingegneria, basi di dati digitali e stampanti a DNA, stava dando ai geni una nuova libertà di fluire, nuovi modi di replicarsi, nuovi habitat da popolare, nuovi organismi da sedurre. La forma originale potrebbe estinguersi, ma molte funzioni possono ritornare e a un certo punto – nessuno può realmente dire quale – quella rinascita potrebbe portare un organismo fino al punto di essere «non più morto».

Gli oli essenziali avevano saturato l'aria della sala, che così era diventata un'improbabile oasi tropicale, con un accenno di fumo in lontananza, ed era facile immaginare i campi di lava dello Haleakalā calcinati dal Sole nel remoto passato: attorno una foresta di ibischi di montagna, accesa di rossi uccelli dal becco ricurvo che saettano da un fiore all'altro. Quel mondo non ritornerà, ma alcuni degli innumerevoli geni delle Hawaii primordiali e di altri paesaggi perduti potrebbero anche farlo. Stanno premendo contro la membrana dell'estinzione, sondandola, impazienti di cogliere la possibilità di tornare in azione. ■

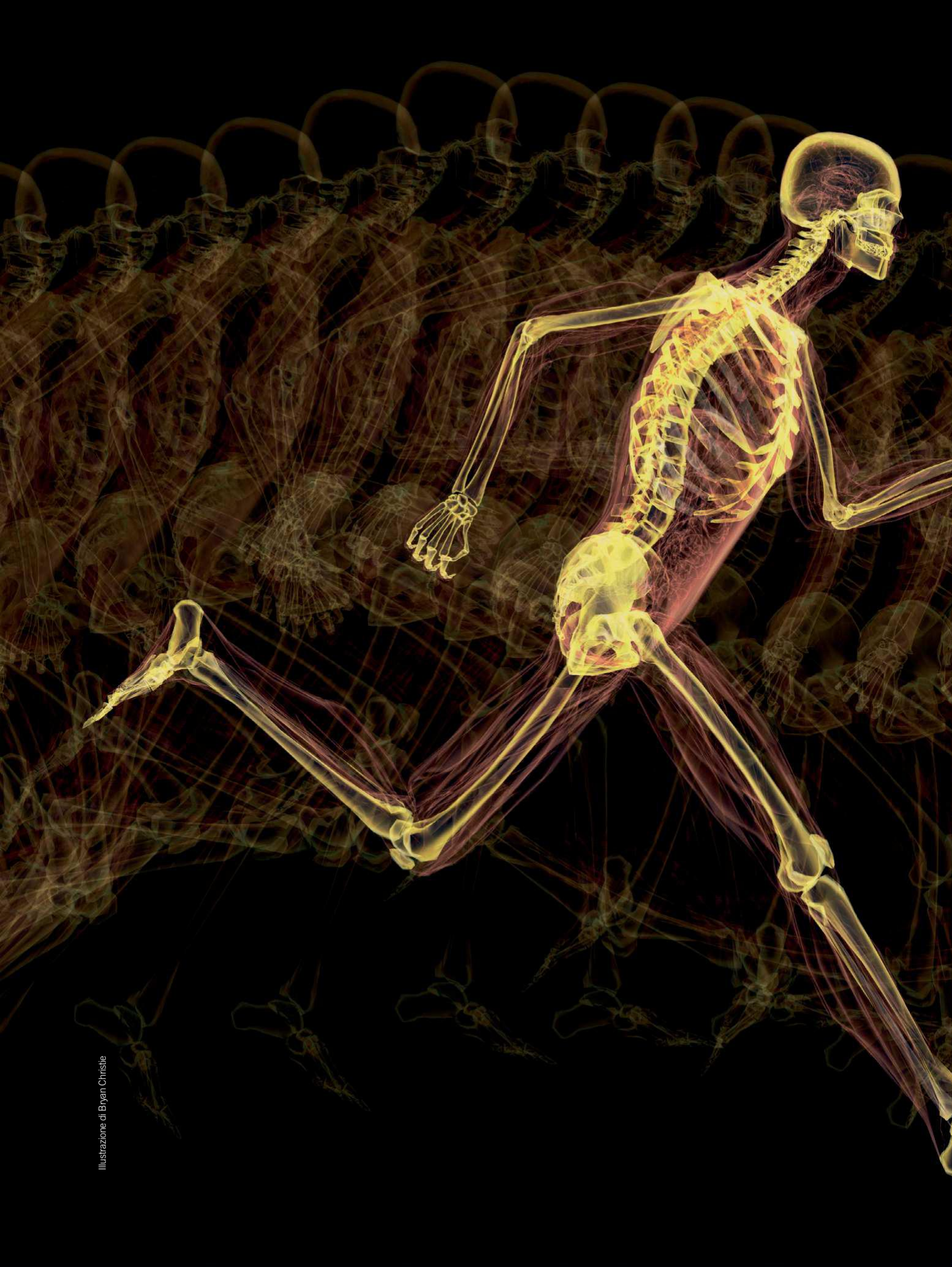
PER APPROFONDIRE

Timing and Causes of Mid-Holocene Mammoth Extinction on St. Paul Island, Alaska. Graham R.W. e altri, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 113, n. 22, pp. 9310-9314, 16 agosto 2016.

Natural Selection Shaped the Rise and Fall of Passenger Pigeon Genomic Diversity. Murray G.G.R. e altri, in «Science», Vol. 358, pp. 951-954. 17 novembre 2017.

Hibiscadelphus wilderianus nella Lista rossa delle specie minacciate compilata dall'IUCN: **www.iucnredlist.org/species/30397/9536660.**

Antichi DNA. Pääbo S., in «Le Scienze» n. 305, gennaio 1994.

Illustrazione di Bryan Christie

EVOLUZIONE

EVOLUTI PER ESSERE ATTIVI

A differenza delle grandi scimmie nostre cugine, noi esseri umani abbiamo bisogno di livelli elevati di attività fisica per essere in salute

di Herman Pontzer

Herman Pontzer è professore associato di antropologia evoluzionistica alla statunitense Duke University. Studia come l'evoluzione ha plasmato fisiologia e salute umane.

Nell'umidità di una foresta pluviale dell'Uganda, quasi vent'anni fa, poco prima dell'alba scrutavo attraverso la fitta volta del fogliame sopra di me un gruppo di otto scimpanzé addormentati. La nostra squadra, tre ricercatori e due collaboratori, si era svegliata un'ora prima per infilarsi gli stivali di gomma, riempire gli zaini e prendere un sentiero fangoso alla luce delle torce dei caschi. Ora eravamo arrivati a destinazione e, spente le luci, immersi nell'oceano nero della foresta a 30 metri dalla superficie, ascoltavamo in silenzio i cupi borbottii degli scimpanzé che si rigiravano sui giacigli di foglie.

Ero un giovane dottorando e studiavo l'evoluzione degli esseri umani e delle grandi scimmie antropomorfe; quell'estate mi trovavo nel Parco nazionale di Kibale per misurare quanto si arrampicano sugli alberi ogni giorno gli scimpanzé. Avevo l'impressione che l'energia spesa nell'arrampicarsi poteva essere stata un fattore essenziale nell'ecologia e nell'evoluzione degli scimpanzé, plasmandone l'anatomia in modo da massimizzare l'efficienza dell'arrampicata e liberare più calorie per la riproduzione e altre esigenze primarie.

Qualche mese prima, riflettendo sui miei programmi estivi di ricerca da una comoda scrivania alla Harvard University mentre nevicava, immaginavo gli scimpanzé impegnati in un'eroica lotta per l'esistenza, lavorare duro giornalmente per sbarcare il lunario. Ma quell'estate, via via che mi calavo nel ritmo del lavoro sul campo, seguendo gli scimpanzé dall'alba al tramonto, arrivai a una conclusione diversa: gli scimpanzé sono scansafatiche. E solo di recente ho imparato ad apprezzare quello che la pigrizia delle grandi scimmie può dirci sull'evoluzione umana.

Siamo attirati dalle grandi scimmie perché vediamo così tanto di noi in loro. Non solo perché condividiamo il DNA per oltre il 97 per cento con orangutan, gorilla, scimpanzé e bonobo. Le grandi scimmie sono intelligenti, usano attrezzi, litigano e fanno la pace, e si appartano per fare sesso di nascosto. Qualcuna uccide i vicini per difendere il territorio e caccia altre specie per cibarsene. I piccoli imparano dalla madre, fanno la lotta e giocano fra loro, e fanno i capricci. E più andiamo indietro nel tempo nel registro fossile, più i nostri antenati somigliano a queste scimmie. Nessuna delle specie viventi oggi è un perfetto modello del passato: ogni linea di discendenza cambia nel tempo. Ma le grandi scimmie che vivono oggi ci danno la possibilità migliore di vedere da dove veniamo e di capire quanto di antico e immutato c'è in noi.

Eppure sono le differenze, più che le somiglianze, tra esseri umani e grandi scimmie a gettare nuova luce su come funziona il nostro corpo. Le scoperte da scavi fossili, zoo e laboratori di ogni parte del mondo stanno rivelando quanto radicalmente siano cambiati i nostri corpi negli ultimi 2 milioni di anni. Da decenni sappiamo che quest'ultimo capitolo della nostra storia evolutiva è stato segnato da importanti cambiamenti anatomici ed ecologici, fra cui espansione delle dimensioni cerebrali, caccia e raccolta, strumenti in pietra sempre più complessi e aumento delle dimensioni corporee. Ma in genere i ricercatori hanno dato per scontato che i cambiamenti riguardassero forma del corpo e comportamento, non le funzioni fondamentali delle nostre cellule. I progressi in corso stanno sovvertendo quest'ottica, perché mostrano come gli esseri umani siano cambiati anche nella fisiologia. A differenza dalle scimmie nostre cugine, la nostra evoluzione ci ha portato a dipendere dall'attività fisica. Per sopravvivere, dobbiamo muoverci.

Il paradiso perduto

Una giornata tipica di uno scimpanzé allo stato selvatico fa pensare al programma giornaliero per un letargico pensionato in crociera ai Caraibi, pur con qualche attività organizzata. Sveglia presto alle prime luci dell'alba, poi colazione (frutta). Mangi fino a quando sei pieno, e poi ti trovi un bel posto per una breve dormita, magari un grooming leggero. Dopo un'ora circa (niente fretta),

IN BREVE

I nostri parenti viventi più stretti, le grandi scimmie antropomorfe, hanno bassi livelli di attività fisica, ma questa pigrizia non ha effetti negativi sulla loro salute.

Per gli esseri umani, invece, l'evoluzione ha reso necessario un livello elevato di attività fisica per restare in salute.

Nuovi studi rivelano che negli ultimi due milioni di anni ci sono stati cambiamenti anatomici e comportamentali, e anche nella fisiologia.

La nostra fisiologia si è adattata all'attività di uno stile di vita basato su caccia e raccolta.

David Cayless/Getty Images

Dolce far niente: una famiglia di gorilla di montagna a riposo in Rwanda. Le grande scimmie restano in buona salute a bassi livelli di attività.

vai a cercare un albero di fichi soleggiato e ti ingozzi. Poi magari incontri qualche amico, ancora un po' di grooming, un altro pisolino. A cena presto, verso le cinque di pomeriggio (sempre frutta, forse qualche foglia), ed è giunto il momento di trovarsi l'albero giusto, prepararsi il giaciglio e chiudere la serata. Certo, ci sono frenetici cori di ansiti e grida (*pant-hoot*) quando la frutta è molto buona, ogni tanto c'è un tafferuglio oppure si va a caccia di scimmie più piccole, e tutti i giorni il maschio alfa deve trovare un po' di tempo per maltrattare qualcuno o esibire la sua possanza. In generale però la vita degli scimpanzé è abbastanza tranquilla.

E non sono i soli. Anche la vita di orangutan, gorilla e bonobo sembra scorrere nella sorta di indolenza contro cui ci mettono in guardia le favole per bambini e i corsi antidroga alle scuole superiori. Le grandi scimmie antropomorfe passano tra otto e dieci ore al giorno a riposare, fare grooming e mangiare, poi dormono nove o dieci ore per notte. Scimpanzé e bonobo camminano per circa 3 chilometri al giorno, gorilla e orangutan ancora meno.

E le arrampicate sugli alberi? Come ho scoperto quell'estate, gli scimpanzé si arrampicano per circa 100 metri al giorno, che come spesa calorica equivale a camminare per un altro chilometro e mezzo. Gli orangutan fanno più o meno lo stesso, e i gorilla sicuramente di meno, sebbene le loro ascese debbano ancora essere misurate.

Negli esseri umani, questi livelli di attività sarebbero una ricetta per seri problemi di salute. Per noi, fare meno di 10.000 passi al giorno è associato a un aumento del rischio di malattie cardiovascolari e metaboliche. Gli adulti degli Stati Uniti ne fanno tipicamente circa 5000, e questo contribuisce agli allarmanti tassi di diabete di tipo 2, che colpisce uno statunitense su dieci, e di malattie del cuore, che rendono conto di un quarto di tutte le morti del paese. Alla luce di questi fatti, le grandi scimmie dovrebbero essere nei guai. Convertendo le loro camminate e arrampicate in passi al giorno per un confronto tra specie, vediamo che quei primati arrivano solo di rado anche ai modesti numeri di passi delle persone sedentarie, e non si avvicinano mai al valore di riferimento umano dei 10.000 passi al giorno.

E poi c'è tutto il tempo che passano sedute a riposare. Negli esseri umani, stare seduti alla scrivania o davanti al televisore per periodi prolungati è associato con un aumento del rischio per malattie e con una durata della vita più breve, anche tra coloro che fanno esercizio fisico. Globalmente si può sostenere che l'inattività fisica è al livello del fumo, come rischio per la salute; uccide oltre 5 milioni di persone all'anno. In un gruppo di scozzesi adulti, quelli che guardavano la televisione per più di due ore al giorno mostravano un incremento del 125 per cento di eventi cardiaci come infarti o ictus. Uno studio su adulti australiani ha riferito che ogni ora di televisione accumulata accorcia la speranza di vita di 22 minuti. Vi risparmio i calcoli: guardare tutto *Il Trono di Spade*, 63 ore e mezzo, costa un giorno di vita in meno.

Eppure scimpanzé e altre grandi scimmie restano notevolmente sane ai loro abituali bassi livelli di attività fisica. Anche in cattività, il diabete è raro e la pressione del sangue non cresce con l'età. Gli scimpanzé hanno per natura alti livelli di colesterolo, ma le loro arterie non si induriscono e non si otturano. Di conseguenza, non sviluppano malattie cardiache di tipo umano e non hanno attacchi cardiaci dovuti a occlusioni delle coronarie. E rimangono magri. Nel 2016, con Steve Ross del Lincoln Park Zoo di Chicago e un gruppo di collaboratori, ho misurato tassi metabolici e composizione corporea delle grandi scimmie antropomorfe degli zoo degli Stati Uniti. I risultati sono stati rivelatori: anche in cattività, nel corpo di gorilla e orangutan in media c'è solo tra il 14 e il 23 per cento di grasso, e negli scimpanzé appena il 10 per cento, alla pari con gli atleti olimpici.

Fra i nostri cugini primati, insomma, quelli strani siamo noi. In qualche modo gli esseri umani si sono evoluti per richiedere livelli di attività fisica assai più elevati affinché i nostri corpi funzionino normalmente. Passare ore e ore seduti, a spulciarsi l'un l'altro e sonnecchiare (o guardare la televisione), erano pratiche standard

che sono diventate un rischio per la salute. Ma quando abbiamo barattato l'esistenza in tono minore delle nostre compagne grandi scimmie per un modo di vivere più faticoso, e perché? Le scoperte fossili aiutano a ricostruire questa storia.

Diramazioni

Il nostro ramo dell'albero genealogico dei primati, gli ominini, si è separato da quello degli scimpanzé e dei bonobo sei o sette milioni di anni fa, verso la fine del periodo geologico detto Miocene. Fino a tempi piuttosto recenti, erano stati scoperti pochi fossili ominini risalenti agli inizi di questa linea di discendenza. Poi, nei primi dieci anni di questo secolo, in rapida successione paleoantropologi al lavoro in Ciad, Kenya ed Etiopia hanno scoperto i resti di tre ominini di questo periodo cruciale: *Sahelanthropus*, *Orrorin* e *Ardipithecus*.

Ciascuno di questi primi ominini è ben distinto da tutte le grandi scimmie viventi nei dettagli anatomici del cranio, dello scheletro e dei denti. Eppure, a parte l'andatura bipede, sembra che queste specie abbiano vissuto un'esistenza molto simile a quella delle grandi scimmie. Per dimensione e capacità di essere affilati i molari dei primi ominini erano simili a quelli degli scimpanzé, con smalto alquanto più spesso, suggerendo una dieta mista di frutta e altri cibi vegetali. *Ardipithecus*, scoperto in Etiopia in depositi vecchi di 4,4 milioni di anni, di gran lunga il meglio conosciuto tra i primi ominini, aveva braccia lunghe, dita lunghe e incurvate e piedi prensili, indicativi di una vita spesa in parte sugli alberi. Nuove analisi biomeccaniche, effettuate da Elaine Kozma, mia *graduate student* alla City University di New York, mostrano che *Ardipithecus* aveva evoluto cambiamenti nella sua anatomia pelvica che permettevano un'andatura pienamente eretta ed energeticamente efficiente senza compromettere la capacità di arrampicarsi. I nostri primi antenati erano chiaramente a proprio agio in due i mondi, a terra e sugli alberi.

Da 4 a 2 milioni di anni fa circa, il registro fossile ominino è dominato dal genere *Australopithecus*, con almeno cinque specie oggi riconosciute, fra cui quella della famosa «Lucy». I cambiamenti anatomici degli arti inferiori indicano migliori capacità deambulatorie e più tempo trascorso a terra rispetto alle specie precedenti. In *Australopithecus* il piede non è più prensile, l'alluce è in linea con le altre dita, e le gambe sono più lunghe, con lo stesso rapporto tra lunghezza della gamba e massa corporea che osserviamo negli esseri umani attuali. Le analisi della pelvi condotte da Kozma, insieme al recente lavoro sulle orme fossilizzate di Laetoli, in Tanzania, indicano che l'andatura di queste creature era praticamente moderna. Braccia e dita lunghe ci dicono che questi ominini andavano ancora regolarmente sugli alberi a cercare il cibo e forse anche per dormire. L'analisi dei segni di usura dei denti fa pensare che le specie di *Australopithecus* mangiassero prevalentemente vegetali, come i primissimi ominini prima di loro e le grandi scimmie viventi ancora oggi. A giudicare dai molari grossi e dallo smalto spesso, l'alimentazione di *Australopithecus* si basava con tutta probabilità su cibi più duri e più fibrosi, in particolare quando non erano disponibili i cibi preferiti.

L'evoluzione di un'andatura bipede eretta in questi antichi ominini è importante, e indica una diversa modalità di spostamento nel paesaggio. La capacità di coprire distanze più grandi con meno calorie potrebbe aver permesso a queste specie di espandere il proprio territorio e prosperare in habitat meno produttivi rispetto alle grandi scimmie attuali. Ci sono altri cambiamenti notevoli e interessanti, come la perdita dei canini grandi e aguzzi dei maschi, che sembra riflettere una diversità di comportamento sociale. Eppure la dieta a base vegetale e il mantenimento degli adattamenti per l'arrampicata ci dicono che la loro posizione ecologica di raccoglitori e le loro attività quotidiane restavano ampiamente simili a quelle delle grandi scimmie. Le distanze coperte ogni giorno erano probabilmente modeste, e molto tempo era dedicato al riposo e alla lunga digestione di cibi vegetali fibrosi. È improbabile che avessero bisogno di 10.000 passi al giorno, o che li facessero spesso.

Verso i 2 milioni di anni fa cominciarono a emergere segni della presenza di ominini dotati di curiosità o di ingegno, che sperimentavano idee e approcci nuovi. Nel 2015 Sonia Harmand, della Stony Brook University, e il suo gruppo hanno recuperato strumenti di pietra, grandi e poco maneggevoli, alcuni dei quali pesano quasi 14 chilogrammi, da sedimenti vecchi di 3,3 milioni di anni sulla sponda occidentale del lago Turkana, in Kenya. Negli ultimi 15 anni gli scavi condotti in siti risalenti a 2,6 milioni di anni fa sia in Etiopia sia in Kenya hanno scoperto strumenti litici associati con ossa animali fossilizzate che avevano solchi e raschiature inequivocabilmente legati alla macellazione. Ossa con segni di taglio e strumenti di pietra erano ormai la norma 1,8 milioni di anni fa, e a cadere preda di questi ominini non erano solo animali malati o feriti: le analisi delle ossa macellate della gola di Olduvai, in Tanzania, mostrano che venivano presi di mira ungulati nel fiore degli anni. Altrettanto importante è che, contrariamente a tutti gli ominini precedenti, questi ominini di 1,8 milioni di anni fa si erano espansi fuori dall'Africa nell'Eurasia, dalle colline ai piedi delle catena montuosa del Caucaso fino alle foreste pluviali indonesiane. I nostri predecessori avevano saltato il fossato ecologico e ormai erano capaci di prosperare quasi ovunque.

In ecologia ed evoluzione, dieta è destino. Il cibo che gli animali mangiano plasma denti e intestini, e anche la loro fisiologia e stile di vita

Dimentichiamoci i racconti di qualche incontro clandestino nei giardini dell'Eden o Prometeo che porta in dono il fuoco. Fu questa lunga consuetudine con la pietra e con la carne, e lo sviluppo di una strategia di caccia e raccolta, ad allontanare sempre di più la nostra linea di discendenza dalle altre grandi scimmie, cambiando le cose in modo irrevocabile. Questo spostamento epocale segnò la nostra comparsa evolutiva, quella del genere *Homo*.

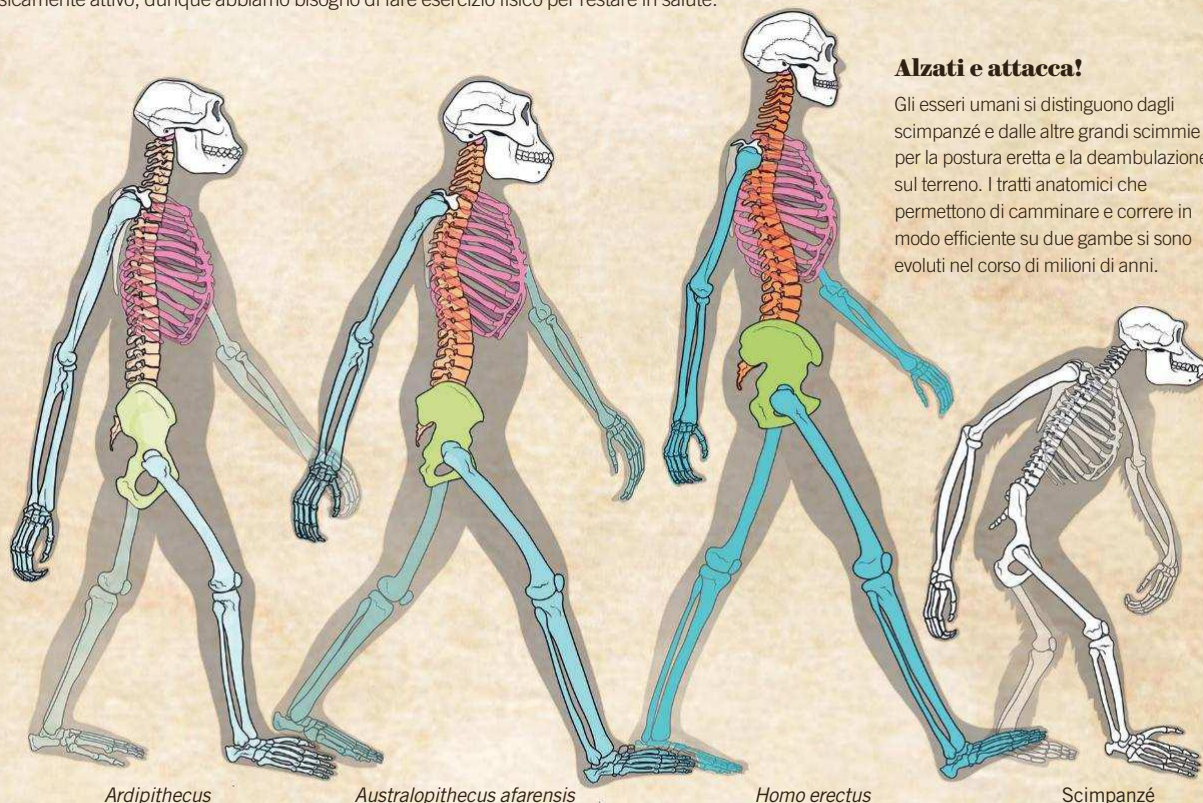
Cibo, per la mente

In ecologia ed evoluzione, dieta è destino. Il cibo che gli animali mangiano non plasma solo denti e intestini, ma anche la loro fisiologia e il loro stile di vita. Le specie evolutesi per mangiare cibi che sono abbondanti e immobili non hanno bisogno di spingersi troppo lontano o di essere molto intelligenti per saziarsi; l'erba non si nasconde e non scappa. Mangiare cibi più difficili da trovare o da catturare significa più spostamenti, spesso insieme a una maggiore raffinatezza cognitiva. Per esempio, le scimmie ragno del Sud e

Fatti per muoverci

Con l'evoluzione di cambiamenti anatomici che facilitavano la deambulazione eretta (*sotto*), gli ominini sono stati in grado di percorrere distanze più grandi spendendo meno energia, e quindi di espandersi in nuovi habitat. Il successivo avvento della caccia ha aumentato ulteriormente i livelli di attività degli ominini, obbligandoli a spostarsi su distanze ancora più grandi per trovare il cibo. La nostra fisiologia si è adattata a questo modo di vita fisicamente attivo, dunque abbiamo bisogno di fare esercizio fisico per restare in salute.

Alzati e attacca!

Gli esseri umani si distinguono dagli scimpanzé e dalle altre grandi scimmie per la postura eretta e la deambulazione sul terreno. I tratti anatomici che permettono di camminare e correre in modo efficiente su due gambe si sono evoluti nel corso di milioni di anni.

Ardipithecus — *Australopithecus afarensis* — *Homo erectus* — Scimpanzé

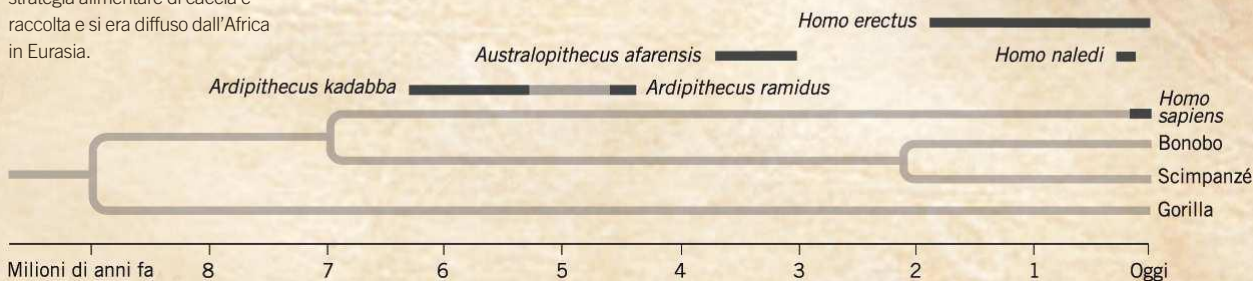
Evoluzione, un pezzo alla volta

I primi antenati umani, compresi *Ardipithecus* e *Australopithecus*, camminavano su due gambe ma mantenevano anche adattamenti alla vita arboricola, un'alimentazione a base vegetale simile a quella delle grandi scimmie odierne e vivevano solo in Africa. Ma 1,8 milioni di anni fa *Homo* aveva evoluto proporzioni moderne del corpo, adottato una strategia alimentare di caccia e raccolta e si era diffuso dall'Africa in Eurasia.

Torso verticale e foro centrale nella base cranica per il passaggio del midollo spinale		
Forma della colonna vertebrale ignota	Colonna vertebrale a S	Vertebre lombari ingrossate
Pelvi concava	Riduzione dell'ischio	Pelvi più robusta
Arti inferiori corti, arti superiori lunghi	Arti superiori e inferiori allungati	Arti inferiori lunghi, dita e arti superiori corti

Homo erectus
Australopithecus afarensis
Homo naledi
Ardipithecus kadabba
Ardipithecus ramidus
Homo sapiens
Bonobo
Scimpanzé
Gorilla

Milioni di anni fa 8 7 6 5 4 3 2 1 Oggi

Illustrazione di Mesa Schumacher

del Centro America, che mangiano frutta, hanno cervelli più grandi e si spostano cinque volte più lontano ogni giorno rispetto alle scimmie urlatrici, ghiotte di foglie, con cui condividono la foresta. I carnivori della savana africana si spostano ogni giorno tre volte più lontano rispetto agli erbivori che cacciano.

Passare da uno stile di vita di pura raccolta, quello delle grandi scimmie, alla strategia di caccia-e-raccolta dei primi ominini, che contrassegna il genere *Homo*, ha avuto diverse ripercussioni importanti. Ha reso questi primati sociali ancora più uniti. Contare sulla carne richiede cooperazione e condivisione, e non solo perché nessuno può uccidere o mangiare una zebra da solo. Oggi le popolazioni di cacciatori-raccoglitori ricavano circa la metà delle calorie giornaliere dalle piante. Recenti analisi di residui di cibo nel tartaro dentale fossilizzato mostrano che i Neanderthal, grandi cacciatori e ispiratori dei seguaci della «dieta paleolitica» anti-vegetariana, avevano una dieta bilanciata e ricca di vegetali, cereali compresi.

Caccia e raccolta, inoltre, hanno premiato l'intelligenza dal punto di vista evolutivo. Innovazione tecnologica e creatività significavano più calorie e maggiori possibilità di riprodursi. L'intelligenza sociale doveva assumere un valore inestimabile, via via che coordinamento e comunicazione si integravano sempre più nelle strategie ominine. Le scoperte effettuate da Alison Brooks, della George Washington University, Rick Potts, dello Smithsonian National Museum of Natural History, e colleghi al sito del bacino di Olorgesailie, in Kenya, e pubblicate nel 2018, mostrano che 320.000 anni fa la cognizione ominina era ormai sbocciata nel tipo di raffinatezza osservata negli esseri umani moderni, con pigmenti neri e rossi per l'espressione visiva e reti di scambio a lunga distanza dei materiali litici più adatti per ricavarne strumenti. L'età di queste scoperte corrisponde bene a quella, pubblicata nel 2017, dei più antichi fossili di *Homo sapiens* trovati finora, provenienti dal sito di Jebel Irhoud, in Marocco, di 300.000 anni fa.

I cacciatori-raccoglitori di oggi, come gli Hadza, non sviluppano malattie cardiache, diabete o altre patologie che colpiscono i paesi industrializzati

Inoltre caccia e raccolta hanno imposto agli ominini di lavorare più duramente per procurarsi il cibo. Già solo spostarsi verso il vertice della catena alimentare significa che trovare il cibo diventa più difficile: in natura, le calorie vegetali sono molte di più di quelle animali. I cacciatori-raccoglitori sono notevolmente attivi, percorrono a piedi dai 9 ai 14 chilometri al giorno, dai 12.000 ai 18.000 passi circa. Il lavoro di David Raichlen, dell'Università dell'Arizona, Brian Wood, oggi all'Università della California a Los Angeles, e del sottoscritto presso la popolazione degli Hadza, cacciatori-raccoglitori della Tanzania settentrionale, mostra che uomini e donne di questo gruppo fanno più attività fisica in un giorno che gli statunitensi tipicamente in una settimana; e si spostano giornalmente su distanze da tre a cinque volte superiori rispetto alle grandi scimmie. I primi membri del nostro genere, senza i benefici di innovazioni tencnologiche come archi e frecce, erano forse ancora più attivi. In un fondamentale lavoro del 2004, Dennis Bramble, dell'Università dello Utah, e Daniel Lieberman, della Harvard University, hanno sostenuto che il nostro genere si è evoluto in modo da poter inseguire la preda fino allo sfinimento, indicando una caratteristiche nello scheletro di *Homo erectus* che sembrano legati alla corsa di resistenza.

Il costante incremento delle dimensioni cerebrali e della complessità della tecnologia degli ultimi 2 milioni di anni può dare l'idea di un progresso a valanga, ma sarebbe illusorio pensare a un processo inarrestabile. L'evoluzione ha una grande memoria, ma nessun piano. Nel 2015 Lee Berger, dell'Università del Witwatersrand, in Sudafrica, e il suo gruppo hanno annunciato la scoperta di centinaia di fossili di *Homo naledi*, una nuova specie rinvenuta nelle profondità del sistema di grotte chiamato Rising Star, sempre in Sudafrica, datati tra i 335.000 e i 236.000 anni fa. Con un cervello solo del 10 per cento più grande di quello di *Australopithecus* e dimensioni del corpo simili a quelle dei primi *Homo*, questo ominino sembra rappresentare una linea di discendenza che rientra nel nostro stesso genere ma è rimasta ferma agli inizi del Pleistocene, sopravvivendo felicemente per oltre un milione di anni senza il continuo incremento delle dimensioni cerebrali osservato in altre specie di *Homo*. *H. naledi* è importante perché ci ricorda che l'evoluzione non tende a una meta. Noi non eravamo inevitabili.

Gli squali della savana

Nessun tratto biologico si evolve isolatamente: il cervello deve entrare nella scatola cranica, i denti devono inserirsi nella mascella; muscoli, nervi e ossa devono funzionare in modo armonico. I tratti comportamentali non fanno eccezione. Quando una strategia comportamentale – come quella di caccia e raccolta – diventa la norma, la fisiologia vi si adatta e può addirittura dipenderne.

Prendiamo per esempio la vitamina C. Nei primi mammiferi si era evoluta una via biosintetica a più stadi per produrre in proprio questo nutriente essenziale: un processo a cascata con diversi geni, che restano funzionali in roditori, carnivori e molti altri mammiferi. Decine di milioni di anni fa, i nostri antenati primati erano diventati così fissati con i frutti ricchi di vitamina C che produrla in proprio divenne un costo non più necessario. La loro fisiologia si adattò al loro comportamento, e nel gene necessario per l'ultimo passaggio della sintesi si accumularono mutazioni. Di conseguenza i primati antropoidi odierni – scimmie, grandi scimmie ed esseri umani – non sono in grado di fabbricare la vitamina C. Se nella dieta non c'è, ci ammaliamo di scorbuto e finiamo per morire.

Più distante da noi, ma più rilevante per il discorso, è una forma specializzata di respirazione detta *ram ventilation* in varie specie di squali e di sgombridi (un gruppo di pesci di cui fanno parte sgombri e tonni). In queste linee di discendenza si è evoluto un comportamento di ricerca del cibo molto attivo, in cui l'animale non smette mai di nuotare, giorno e notte. Anatomia e fisiologia si sono adattate, sfruttando il movimento ininterrotto per incanalare acqua nella bocca e attraverso le branchie. Questo cambiamento ha eliminato la necessità di pompare l'acqua nelle branchie, portando alla perdita evolutiva della relativa muscolatura branchiale; il che fa risparmiare energia ma espone queste specie al rischio di soffocare: se smettono di muoversi, muoiono.

Da tempo sappiamo che a noi esseri umani l'esercizio fisico fa bene, ma solo oggi cominciamo a renderci conto dei tanti modi in cui la nostra fisiologia si è adattata allo stile di vita fisicamente attivo basato su caccia e raccolta. Sono coinvolti quasi tutti i sistemi

e gli organi, fino al livello cellulare. Alcune delle ricerche più interessanti in questo settore si sono concentrate sul cervello. Innanzitutto, il nostro cervello si è evoluto in modo da aver meno bisogno di sonno, anche in società prive di illuminazione artificiale e intrattenimenti notturni. In tutto il mondo gli esseri umani – gli Hadza della savana africana e gli orticultori Tsimane della foresta pluviale amazzonica e i sofisticati cittadini di New York – dormono circa sette ore per notte, assai meno delle grandi scimmie.

Raichlen e colleghi hanno dimostrato che il nostro cervello si è evoluto in modo da ricompensare la prolungata attività fisica, producendo cannabinoidi endogeni – si parla di «euforia del corridore» – in risposta all'esercizio fisico aerobico, come la corsa. Raichlen e altri hanno anzi sostenuto che l'esercizio ha contribuito a rendere possibile la massiccia espansione del cervello umano e che ci siamo evoluti in modo da richiedere l'attività fisica per il normale sviluppo cerebrale. L'esercizio provoca il rilascio di molecole neurotrofiche che promuovono neurogenesi e crescita cerebrale, ed è noto che migliora la memoria e rallenta il declino cognitivo legato all'età.

Anche i nostri meccanismi metabolici si sono evoluti in modo da adattarsi alla maggiore attività. La potenza aerobica massima, o VO_{2max}, degli esseri umani è almeno quattro volte più grande di quella degli scimpanzé. Questo incremento emerge in larga parte dai muscoli delle nostre gambe, che sono del 50 per cento più grandi e hanno una proporzione assai maggiore di fibre muscolari «lente», resistenti alla fatica, rispetto a quelli delle altre grandi scimmie. Inoltre, abbiamo più globuli rossi che portano l'ossigeno ai muscoli. Ma l'adattamento all'esercizio fisico sembra essersi spinto ancora più in profondità, aumentando la velocità con cui le nostre cellule funzionano e bruciano calorie. Il mio lavoro con Ross, Raichlen e altri ha mostrato che negli esseri umani si è evoluto un metabolismo più rapido, che alimenta la maggiore attività fisica e altri tratti energeticamente dispendiosi che distinguono gli esseri umani, compreso il cervello più grosso.

Il complesso di queste prove indica un nuovo modo di concepire l'attività fisica. A partire dalla moda dell'aerobica degli anni ottanta, l'esercizio fisico è stato venduto come modo per perdere peso o come una delle tante possibili scelte per uno stile di vita sano, come il cornetto integrale a colazione. Ma l'esercizio fisico non è opzionale; è essenziale, e la perdita di peso è probabilmente l'unico beneficio sanitario che in larga misura non riesce a dare. Il nostro corpo si è evoluto in modo da richiedere una quotidiana attività fisica, di conseguenza l'esercizio più che farlo lavorare di più lo fa lavorare meglio. Le ricerche effettuate nel mio e in altri laboratori hanno mostrato che l'attività fisica ha scarso effetto sul consumo energetico quotidiano (i cacciatori-raccoglitori Hadza bruciano ogni giorno lo stesso numero di calorie dei sedentari dell'Occidente), ed è uno dei motivi per cui l'esercizio fisico serve a poco per perdere peso. L'esercizio, invece, regola il modo in cui il corpo consuma energia e coordina compiti essenziali.

Recenti progressi nello studio del metaboloma hanno mostrato che durante l'esercizio i muscoli rilasciano nel corpo centinaia di molecole di segnalazione, e stiamo appena iniziando a capire l'intera portata del loro effetto fisiologico. L'esercizio fisico di resistenza riduce l'infiammazione cronica, serio fattore di rischio per le malattie cardiovascolari. Abbassa i livelli a riposo degli ormoni steroidi testosterone, estrogeno e progesterone, contribuendo a rendere conto del ridotto tasso di tumori dell'apparato riproduttivo fra gli adulti che fanno esercizio regolarmente. L'esercizio fisico potrebbe attenuare il picco mattutino del cortisolo, l'ormone dello stress. È noto che riduce la resistenza all'insulina, cioè il meccanismo alla base del diabete di tipo 2, e nei muscoli contribuisce a convertire il glucosio in glicogeno di riserva anziché in grasso. L'esercizio regolare migliora l'efficacia del nostro sistema immunitario nel bloccare le infezioni, soprattutto con l'invecchiamento. Anche un'attività leggera, come stare in piedi anziché seduti, fa sì che i muscoli producano enzimi che contribuiscono a ripulire il sangue circolante dal grasso.

Non stupisce che popolazioni come gli Hadza non sviluppino malattie cardiache, diabete o altre malattie che affliggono i paesi industrializzati. Ma non c'è bisogno di mascherarsi da cacciatori-raccoglitori o di correre la maratona per godere dei benefici di un modo di vivere più coerente con la nostra storia evolutiva. L'insegnamento che ci offrono Hadza, Tsimane e altri gruppi è che la quantità conta più dell'intensità. Queste persone stanno in piedi e si muovono dall'alba al tramonto, e mettono insieme più di due ore di attività fisica al giorno, che prevalentemente consiste nel camminare. E noi possiamo imitare queste sane abitudini andando a piedi o in bicicletta invece che in auto, facendo le scale e trovando modi di lavorare e di divertirci che non ci facciano stare seduti.

Un recente studio condotto sui postini di Glasgow, in Scozia, ci ha dato un'idea di come si potrebbe fare. Non erano certo degli atleti, ma uomini e donne attivi durante tutta la giornata per gestire la posta. Quelli che facevano 15.000 passi o passavano sette ore in piedi ogni giorno (numeri simili a quelli degli Hadza) erano i più sani dal punto di vista cardiovascolare, e non avevano malattie metaboliche.

Già che ci siamo, c'è anche qualche altra lezione da imparare da gruppi come gli Hadza, per vivere bene. Oltre alla gran quantità di esercizio fisico e a una dieta ricca di nutrienti, in queste culture si vive all'aperto fra amici e parenti. L'egualitarismo è la norma, e la diseguaglianza economica è bassa. Non sappiamo di preciso in che modo questi fattori influiscano sulla salute dei cacciatori-raccoglitori, ma sappiamo che nel mondo sviluppato la loro assenza contribuisce allo stress cronico, che a sua volta promuove obesità e malattie.

Dedicarsi ad abitudini di vita più attive dal punto di vista fisico sarebbe più facile se non dovessimo lottare contro un gorilla da quasi 200 chilogrammi nelle nostre teste. Come la vitamina C per i nostri antenati antropoidi, l'esercizio fisico è stato abbondante e inevitabile negli ultimi 2 milioni di anni dell'evoluzione degli ominini. Non c'era alcun bisogno di cercarlo di proposito, nessuna pressione evolutiva per rinunciare agli scimmieschi difetti della ghiottoneria e la pigrizia. Oggi che siamo padroni degli ambienti in cui viviamo, nell'organizzare il mondo stiamo dando troppo spazio alla scimmia che è in noi: ci riempiamo di cibo facile, guardiamo lo sport invece di farlo, passiamo ore seduti a spulciarci l'un l'altro sui social media.

Ci affascina rivedere noi stessi nelle grandi scimmie, ma quando le vediamo dentro di noi dovremmo preoccuparci. Sotto la superficie siamo diversi, più diversi di quanto sembra. ■

PER APPROFONDIRE

The Crown Joules: Energetics, Ecology, and Evolution in Humans and Other Primates. Pontzer H., in «Evolutionary Anthropology», Vol. 26, n. 1, pp. 12-24, gennaio-febbraio 2017.

Economy and Endurance in Human Evolution. Pontzer H., in «Current Biology», Vol. 27, n. 12, pp. R613-R621, 19 giugno 2017.

Il paradosso dell'attività fisica. Pontzer H., in «Le Scienze» n. 584, aprile 2017.

BIOLOGIA

La vita sociale dei

Relazioni sociali forti aiuterebbero i babbuini a superare le avversità vissute in età precoce. Questo potrebbe significare molto per la salute umana

di Lydia Denworth
fotografie di Nichole Sobecki

Un branco di babbuini gialli si raduna nella semioscurità nel Parco nazionale di Amboseli, in Kenya. I ricercatori li stanno osservando per capire che influenza abbiano i comportamenti sociali sulla salute.

babbuini di Amboseli

Lydia Denworth è una scrittrice scientifica, è autrice di *I Can Hear You Whisper: An Intimate Journey through the Science of Sound and Language* (Dutton, 2014). Attualmente lavora a un libro sulla scienza dell'amicizia.

L'alba è appena spuntata sulla pianura ai margini del Parco nazionale di Amboseli, nel sud del Kenya. In un boschetto di acacie, la giornata inizia bene per un branco di quasi 70 babbuini gialli. Alcuni esemplari più pigri continuano a dormire sui rami più alti, ma gli altri si sono lasciati cadere uno dopo l'altro sull'erba, tra gli arbusti.

Hiawatha, una femmina di sei anni, spulcia il pelo della sorella maggiore, Hoja, togliendo sporcizia e insetti. «È come qualcuno che si sveglia, fa la doccia, si lava i denti e si pettina», dice sottovoce Kinyua Warutere, assistente di campo senior dell'Amboseli Baboon Research Project. «Prima di attivarsi, socializzano in questo modo. Le madri spulciano il pelo ai piccoli, gli amici lo spulciano agli amici».

Alcuni cuccioli stanno già giocando. Il più piccolo di tutti, Huawey, ha meno di due mesi ed è un po' insicuro sulle zampe. Ha ancora la pelliccia nera e i lineamenti del muso rosa acceso tipici dei cuccioli, anche se tra non molto il suo pelo prenderà una tonalità dorata per poi diventare di un marrone grigiastro. Si rotola per terra assieme a un compagno di giochi e i due provano a colpirsi a vicenda, come due gattini, ma ogni pochi minuti Huawey continua a tornare da sua mamma Hiawatha e a infilarsi sotto il suo braccio per un momento, prima di azzardarsi di nuovo a uscire.

Il destino di Huawey e dei suoi compagni di giochi è di particolare interesse per Susan Alberts, che li osserva con il binocolo da un fuoristrada infangato. Biologa dell'evoluzione alla Duke University e condirettrice del progetto, Alberts studia questo branco di babbuini da 34 anni. Fin da quando fu fondato dai primatologi Jeanne e Stuart Altmann nel 1971, il progetto Amboseli ha sempre avuto come obiettivo lo studio delle radici evolutive profonde del comportamento sociale nella vita di questi animali. Ultimamente il lavoro del gruppo si concentra sulle conseguenze a lungo termine di quello che succede in età precoce.

Le probabilità sono già contro Huawey e i suoi compagni, che devono affrontare quelle che Alberts chiama «le forche caudine di Darwin»: tra il 30 e il 50 per cento dei babbuini allo stato brado non sopravvivono al primo anno di vita, soprattutto a causa di stress nutrizionale, malattie e predatori. Ma per alcuni individui le cose sono più difficili che per altri, per esempio se nascono durante un periodo di siccità o se rimangono orfani. Nel primo studio longitudinale prospettivo di questo genere, pubblicato nel 2016,

IN BREVE

Da quasi 50 anni i ricercatori dell'Amboseli Baboon Research Project registrano il comportamento dei babbuini allo stato brado. I dati rivelano che gli esemplari che affrontano avversità in età precoce tendono a morire più giovani rispetto a quelli che non ne affrontano.

Secondo nuove prove, però, il babbuino potrebbe superare le avversità dell'età precoce creando relazioni forti con altri individui della comunità. Per i ricercatori, collegamenti sociali stabili possano avere un ruolo nella salute biologica.

Queste nuove idee della scienza evolutiva potrebbero cambiare il modo in cui pensiamo (e gestiamo) la salute pubblica. Gli esseri umani che affrontano avversità in età precoce tendono ad ammalarsi di più. Le relazioni forti potrebbero aiutare a salvare queste persone dalla loro infanzia difficile?

Il ricercatore sul campo Longida Siodi usa un'antenna per cercare i babbuini, alcuni dei quali indossano collari di tracciamento (*1*). Alcuni membri del branco di Yoda nella pianura (*2*). Il responsabile di progetto Raphael Mututua cerca i babbuini che deve osservare (*3*).

i ricercatori del progetto Amboseli hanno scoperto che le avversità in età precoce riducono drasticamente l'aspettativa di vita, anche della metà.

Di recente, tuttavia, i ricercatori del progetto Amboseli hanno scoperto qualcosa che in teoria potrebbe offrire protezione dalle avversità vissute in età precoce: la presenza di relazioni forti e stabili con altri babbuini. Ora stanno cercando di capire quanto controllo il singolo individuo abbia nell'usare queste relazioni per modificare la traiettoria del proprio destino. Si tratta di una domanda cruciale non solo per i babbuini, ma anche per gli esseri umani che hanno iniziato la vita con un'infanzia in condizioni difficili.

Ovviamente ci sono differenze significative tra i babbuini e gli esseri umani, ma i parallelismi tra gli elementi fondamentali che plasmano la vita – dall'ambiente in cui l'individuo trascorre i primi anni di vita alle relazioni sociali dell'età adulta agli schemi di mortalità – sono notevoli. Addirittura, la ricerca sulle origini evolutive della salute umana ha determinato che un peso ridotto alla nascita e la carente nutrizione materna portano a un aumento del rischio per tutta una serie di problemi di salute in età più avanzata. E gli studi retrospettivi indicano che anche i traumi psicologici subiti in tenera età, come gli abusi o la perdita di un genitore, sono associati a una maggiore probabilità di soffrire di problemi psicologici e medici in età adulta.

Dato che presentano meno variabili a confondere il quadro e un'aspettativa di vita più breve (ma non brevissima), i babbuini offrono un'occasione interessante per collegare la ricerca sull'evoluzione e quella sulla salute umana e anche per capire meglio le origini delle malattie e i modi migliori per proteggerci. Come afferma Elizabeth Archie, direttrice associata del progetto Amboseli ed esperta di ecologia comportamentale della University of Notre Dame: «Il fatto che vediamo un rapporto tra sostegno sociale e longevità in animali che non hanno ospedali né qualcuno che ce li porti significa che ci deve essere qualcos'altro in atto, qualcosa di fondamentalmente biologico». In altre parole, un buono stato di salute non dipende solo dall'accessibilità dell'assistenza sanitaria. La comprensione di questo dato di fatto potrebbe avere conseguenze di ampio raggio per la salute pubblica.

Mettere radici ad Amboseli

Quando gli Altmann arrivarono per la prima volta in Africa nel 1963, erano pochi i primatologi che lavoravano sul campo con animali allo stato brado. I due passarono mesi a esplorare Kenya e Tanzania alla ricerca del posto giusto prima di scegliere il parco di Amboseli come base di ricerca. Con i suoi quasi 390 chilometri quadrati di boschi di acacie e praterie aperte, l'area offriva una buona visibilità e migliaia di babbuini da osservare, come pure elefanti, zebre e giraffe. Dopo aver creato una base di ricer-

Appunti sulle interazioni sociali tra i membri del branco di Acacia (1). Feci di un babbuino giallo del branco di Yoda, che vengono usate per controllare i livelli ormonali e tracciare la genealogia del branco (*2*).

LA CORRELAZIONE

Avversità e sopravvivenza

Un'analisi della vita e della morte di 196 femmine di babbuino vissute allo stato brado nel parco di Amboseli ha dimostrato che le fonti di avversità nei primi anni di vita si sommano tra loro, con conseguenze a lungo raggio sulla longevità. Le femmine che in età precoce avevano sofferto tre o più condizioni negative, come siccità, presenza di fratelli di età simile o morte della madre, morivano in media dieci anni prima rispetto a quelle che avevano avuto un'infanzia meno dura.

Grafico di Amanda Montañez; fonte: *Cumulative Early Life Adversity Predicts Longevity in Wild Baboons*, di Tung, J.E. altri, in «Nature Communications», Vol. 7, art. n. 11181, 19 aprile 2016

ca permanente, nel 1971, Jeanne Altmann, che in origine studiava matematica e che finì per assumersi la responsabilità del progetto, pensò a lungo a come poter registrare in modo rigoroso i dati delle osservazioni e sviluppò un metodo in cui i ricercatori seguono i singoli esemplari in un certo ordine per un dato intervallo di tempo, registrando accuratamente che cosa fa ciascun animale e con chi lo fa. L'articolo sui metodi di osservazione che ne ricavò, pubblicato nel 1974, rese possibile la misurazione valida dei comportamenti osservati in animali allo stato brado ed è diventato una bibbia della primatologia.

Altmann insistette anche perché si facessero due cose molto insolite. La prima era prestare attenzione alle femmine, quando l'aggressività maschile, e l'idea che fosse la competizione violenta a determinare il destino di un esemplare, tendeva a catturare tutta l'attenzione. «C'era questa mentalità, a volte esplicita e a volte implicita, che tutta l'azione dell'evoluzione dipendesse dai maschi», mi ha detto Altmann nell'estate del 2017, quando l'ho incontrata nel suo ufficio alla Princeton University, dove oggi è professoressa emerita di ecologia e biologia evolutiva.

Eppure la società dei babbuini è organizzata secondo direttrici matrilineari e le femmine rimangono nello stesso branco per tutta la vita, mentre i maschi si trasferiscono una volta raggiunta la maturità sessuale. «Avevo questa idea che soprattutto nei mammiferi, e ancor più nei primati, compresi gli esseri umani, le femmine avessero controllo non solo sulla propria vita, nei limiti in cui questo è possibile per chiunque, ma anche sulla generazione successiva. Perché una cosa del genere avrebbe dovuto essere irrilevante nell'evoluzione?». Altmann sapeva anche che avrebbe dovuto impegnarsi per un periodo lunghissimo, raccogliendo dati sullo stesso gruppo di animali per generazioni. «Era evidente che i risultati sarebbero arrivati molto più tardi», dice. «I veri effetti si misurano in termini di generazioni».

Il gruppo di ricerca che si trova oggi ad Amboseli costituisce a sua volta una società matrilineare, in questo caso in termini accademici. Altmann continua a esserne una direttrice. Alberts arrivò ad Amboseli nel 1984, un anno dopo la laurea, e fu tra i primi specializzandi di Altmann prima di diventare direttrice a sua volta. Le due direttrici associate, Archie e Jenny Tung, esperta di biologia evolutiva alla Duke University, sono state specializzande di Alberts. Insieme, le ricercatrici studiano tutto quello che c'è da studiare, dalla composizione demografica dei sei gruppi che seguono al microbioma e alla genetica degli animali. Dei tre keniani che sono assistenti di campo senior, Warutere è il più giovane, con appena 23 anni di esperienza. Sia il responsabile di progetto Raphael Mututua che il suo vice Serah Sayialel hanno iniziato a lavorare per il progetto negli anni ottanta. Persino il personale di campo, come gli autisti e il cuoco, è composto da veterani.

I benefici di una conoscenza così profondamente istituzionalizzata sono evidenti sul campo. Warutere, come anche Mututua e Sayialel, sa riconoscere tutti gli animali a prima vista, anche quan-

Uscita sul campo: Mututua e Siodi osservano il branco di babbuini gialli di Acacia all'imbrunire a inizio novembre (*1*). Uno degli esemplari del branco di Acacia mangia su un albero (*2*).

do sono in movimento o quando li intravede appena tra un albero e l'altro. Mentre osserviamo il gruppo che inizia le attività della giornata, usa un piccolo taccuino giallo per prendere appunti a proposito di nascite, morti, ferite visibili e condizioni riproduttive, che le femmine esibiscono nel variare di dimensioni e di colore del posteriore. Completato questo censimento, Warutere inizia a raccogliere dati seguendo esattamente il metodo definito da Altmann molti anni addietro. Osserva i singoli babbuini per periodi di dieci minuti, notando che cosa fanno (se mangiano, riposano, si spulciano e così via) e con chi. L'assistente di campo e i suoi colleghi si assicurano che ogni animale sia osservato per la stessa durata di tempo totale.

Moltiplicate i dati di questa mattina per due sessioni al giorno, per sei giorni alla settimana, per 52 settimane all'anno e per 48 anni e il risultato è una base di dati quasi senza paragoni in qualsiasi altra popolazione di animali allo stato brado, che copre circa 1800 individui su sei generazioni e mezza. Allo stesso tempo, i dati registrati sono anche dettagliati e nelle tabelle sono codificate le storie di migliaia di singole interazioni come quelle a cui abbiamo appena assistito tra Hoja, Hiawatha e Huawey.

La forza degli inizi

Dopo più di quarant'anni passati ad accumulare dettagli della vita di questi babbuini, gli scienziati di Amboseli hanno iniziato a pensare che la loro ricerca possa essere rilevante per un settore sempre più di rilievo nell'epidemiologia umana: le origini evolutive della salute umana. Le teorie sull'impatto dell'ambiente in cui si vive in età precoce sulle malattie che si contraggono in età adulta avevano già ottenuto risonanza crescente fin dagli anni ottanta, ma finora non erano mai state messe alla prova. E negli esseri umani è difficile separare completamente gli effetti delle avversità vissute in età precoce da quelli delle differenze nelle abitudini di salute o nell'accesso alle cure sanitarie.

L'idea che le origini evolutive potessero essere importanti apparve nel 1986, quando l'epidemiologo britannico David Barker, oggi defunto, pubblicò il primo di una serie di articoli che mettevano in luce un collegamento tra malnutrizione in utero e malattie come diabete, ipertensione e infarti in età adulta. Tra l'altro, l'epidemiologo scoprì che, negli adulti britannici di 60-70 anni, tassi più alti di diabete di tipo 2 erano associati a un peso minore alla nascita. Barker e colleghi avanzarono l'idea che la malnutrizione fetale potesse creare un fattore di rischio a lungo termine per le malattie croniche che tradizionalmente si associano agli adulti in sovrappeso, spiega Chris Kuzawa, antropologo della Northwestern University. Alcuni altri esperimenti incresciosi avvenuti naturalmente suggerivano qualcosa di simile. Per esempio, alla fine della seconda guerra mondiale, nell'inverno 1944-1945, i residenti di una regione dei Paesi Bassi che si trovava sotto l'occupazione nazista dovettero affrontare una carestia quando un blocco ferroviario impedì il rifornimento di alimenti. Gli studi di coorte sui sopravvissuti alla carestia olandese del 1944, nota come *De Hongerwinter* cioè «l'inverno della fame», hanno mostrato effetti in termini di malattie cardiovascolari, metabolismo e funzioni cognitive negli adulti olandesi nati in quel periodo.

Alla luce di questi risultati, nel 1992 Barker e C. Nicholas Ha-

les, biochimico dell'Università di Cambridge, svilupparono l'ipotesi del fenotipo risparmiatore, secondo cui un organismo che si trova ad affrontare condizioni dure in età precoce deve compromettere alcuni aspetti del proprio sviluppo nell'interesse della sopravvivenza a breve termine (la malnutrizione fetale, per esempio, può alterare il metabolismo del glucosio). Circa dieci anni più tardi i due notarono che in alcune specie, soprattutto di insetti, si potevano usare le condizioni vissute in età precoce per prevedere quelle che si sarebbero realizzate in età adulta, quindi perfezionarono l'ipotesi e la chiamarono «risposta predittiva adattativa», un nome che suggerisce che l'adattamento a condizioni difficili in età precoce prepara meglio l'organismo ad affrontare situazioni simili in seguito. Questa teoria sottolinea che uno sfasamento, cioè una malnutrizione precoce seguita da un'abbondanza alimentare, porterebbe alla malattia. L'idea si è diffusa velocemente tra gli esperti di salute pubblica. «Sarebbe difficile esagerare l'accettazione di questi modelli», ha detto Alberts in una presentazione.

La variazione delle risposte adattative dipende dalla nozione di plasticità di sviluppo, che è la capacità di un organismo di trovare modi diversi di affrontare e adattarsi al proprio ambiente. Le dimostrazioni migliori di questo principio si osservano in animali dalla vita breve, come una specie di roditori siberiani (*Microtus hyperboreus*). In base ai segnali ricevuti dalla melatonina materna durante il periodo di gestazione, i roditori nati all'inizio dell'estate maturano e si riproducono rapidamente, mentre quelli che nascono quando le giornate iniziano ad accorciarsi presentano uno sviluppo più lento e non si riproducono finché il Sole non torna.

Altri scienziati sono incappati inavvertitamente nell'ombra lunga degli stress psicologici e sociali precoci. Negli anni ottanta il medico Vincent J. Felitti dirigeva una clinica per l'obesità in California e seguiva una paziente il cui peso sembrava collegato agli abusi sessuali che aveva subito da bambina. Ciò lo spinse a cercare collegamenti tra la vita in una famiglia disfunzionale nell'infanzia e l'esistenza di malattie e comportamenti a rischio in età adulta.

Felitti unì le proprie forze a quelle di altri colleghi, tra cui Robert Anda, che all'epoca lavorava ai Centers for Disease Control and Prevention, per lanciare nel 1995 lo studio Adverse Childhood Experiences (ACE). Lo studio stabiliva sette categorie di esperienze formative, tra cui subire abusi, vivere in un ambiente di violenza domestica e avere parenti in carcere o con tendenze suicide. Tra gli oltre 9500 adulti che risposero al questionario si notava una forte relazione tra il numero di categorie a cui un individuo era stato esposto e la probabilità che mettesse in atto comportamenti a rischio come abuso di sostanze stupefacenti, tentativi di suicidio e altro. L'esposizione a quattro o più categorie corrispondeva a un aumento del rischio di 4-12 volte. Lo studio rilevò anche un aumento del rischio di disturbi cardiaci, cancro e altre malattie.

Nei babbuini di Amboseli, Alberts e Tung hanno visto la possibilità di testare queste idee. Nel 2015 il gruppo ha studiato l'ipotesi della risposta predittiva adattativa usando dati raccolti nel 2009, un anno in cui la siccità aveva causato la morte del 98 per cento degli gnu nel parco. I ricercatori si sono concentrati sulle femmine adulte nate in anni precedenti con precipitazioni ridotte o abbondanti e, dato che il successo riproduttivo è il parametro più importante in biologia evolutiva, ne hanno paragonato la fertilità nel 2009. Come era prevedibile, tutti gli animali avevano meno probabilità di riprodursi durante una grave siccità. Ma in contrasto con il modello della risposta predittiva adattativa (secondo cui essere nata in un anno con poche precipitazioni preparerebbe la femmina alla siccità, rendendo la sua fertilità meno sensibile agli

1

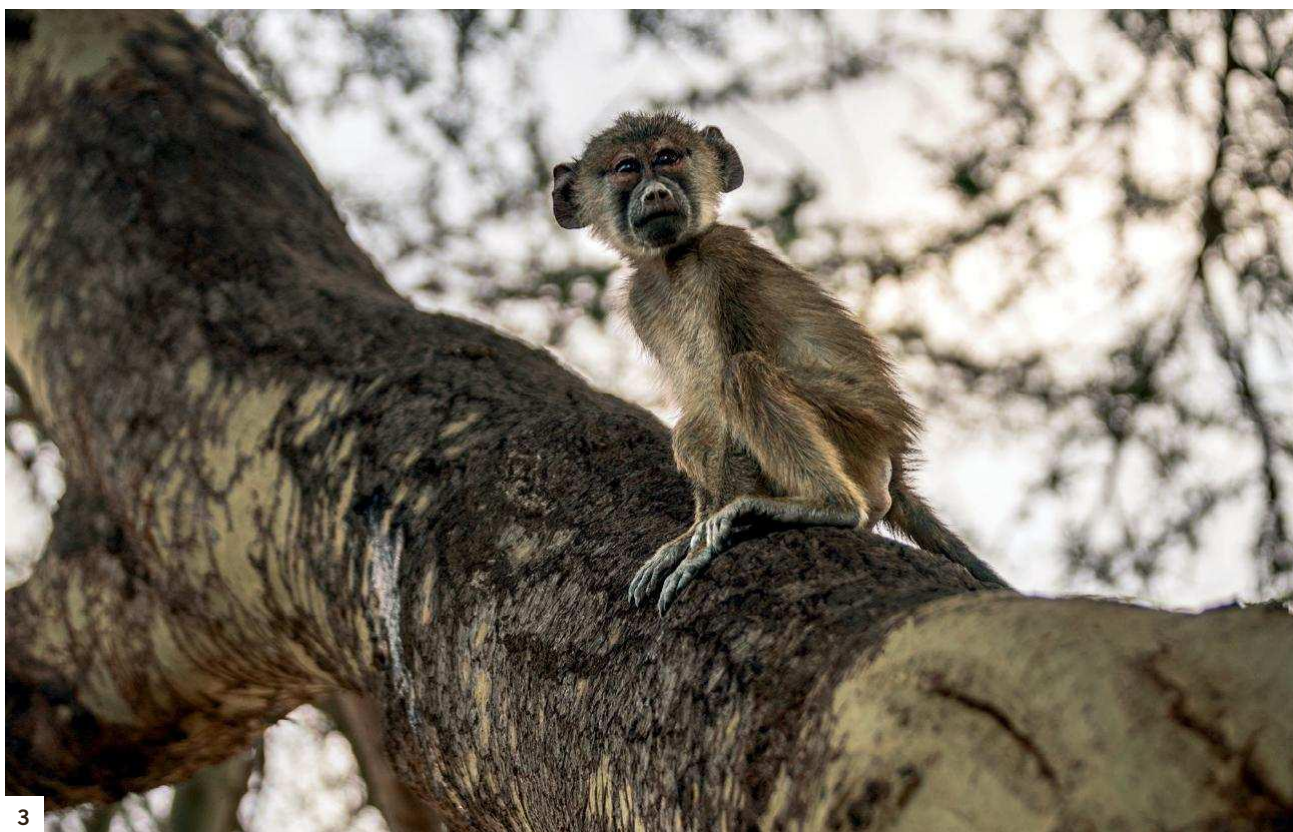
2

L'Amboseli Baboon Research Project studia gli animali dei gruppi di Acacia (*1*, *3*), Yoda (*2*) e altri. I babbuini offrono l'occasione di collegare la ricerca sull'evoluzione e quella sulla salute umana.

effetti di questa), le femmine nate in anni con poche precipitazioni non se la cavavano meglio di quelle degli anni con precipitazioni abbondanti; anzi, avevano risultati addirittura peggiori. Alberts e colleghi ipotizzano che sia in atto un meccanismo quasi opposto a quello della risposta predittiva adattativa: un modello basato sui vincoli dello sviluppo, secondo cui «nascere in un ambiente povero comporta svantaggi in tutti gli ambienti», spiega Alberts.

Il gruppo ha progettato anche una versione dello studio ACE sui babbuini. Essendo riproduttori non stagionali, non esistono mai due babbuini che condividono la stessa esperienza di vita. «Ogni esemplare nasce in un momento diverso, quindi molti aspetti del primo sviluppo dipendono specificamente dalla madre», dice Alberts. Lo studio, pubblicato nel 2016 su «Nature Communications», analizzava la storia di 196 femmine e considerava sei categorie di esperienze avverse nei primi quattro anni di vita: siccità; dimensioni del branco (che influiscono su concorrenza e fertilità); posizione nella gerarchia di dominanza e integrazione sociale della madre; presenza di fratelli nati entro 18 mesi; morte della madre.

I risultati sono stati inequivocabili. I babbuini con tre o più fonti di avversità morivano in media dieci anni prima rispetto a quelli con una o nessuna fonte (la mediana della vita nel branco era di 18,5 anni). Quelli che avevano sofferto maggiori avversità erano anche gli adulti più isolati socialmente. «È un effetto sbalorditivo», commenta Alberts. «Spiega il 12 per cento della variazione nella durata di vita, che è molto per una componente della *fitness*».

Kuzawa, della Northwestern University, che dirige uno stu-

3

dio a lungo termine sulle origini evolutive della salute umana nelle Filippine, ha apprezzato i test empirici effettuati ad Amboseli sul modello della risposta predittiva adattativa, che aveva sempre considerato limitato. Le condizioni di vita in età precoce potrebbero presagire quelle in età adulta per animali con una durata di vita breve come i roditori siberiani, per i quali è più probabile che i fattori ambientali alla nascita siano uguali anche al momento della riproduzione, afferma Kuzawa. Ma il modello non è necessariamente valido per gli esseri umani, che arrivano ai 70 anni e oltre. «Si ripetono sempre le stesse idee, anche se non esistono davvero prove a loro favore», commenta. I babbuini, che possono vivere fino a trent'anni, sono più facilmente paragonabili. È per questo che Kuzawa definisce il progetto Amboseli «una risorsa unica per studiare questi effetti a lungo termine».

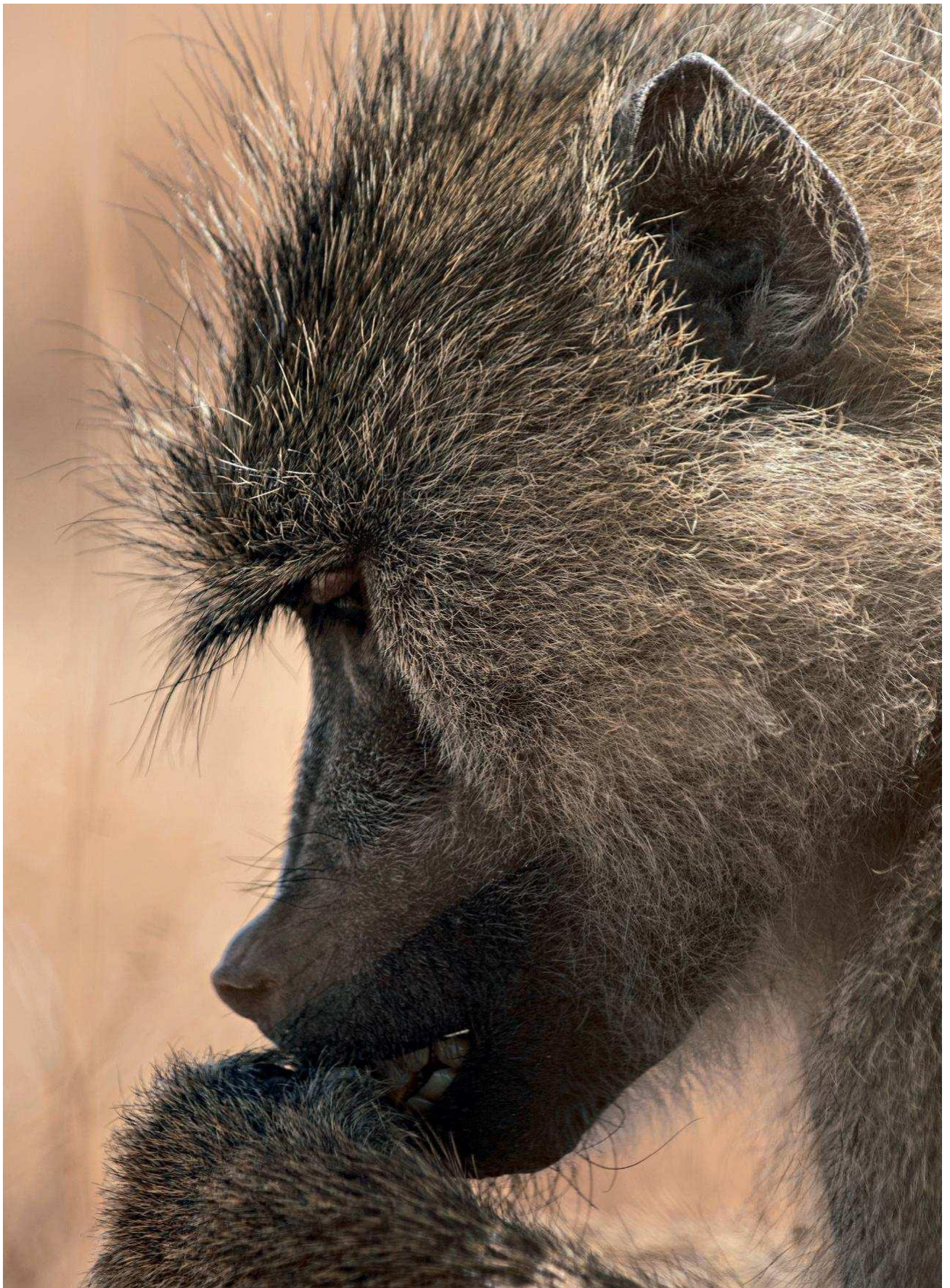
Resilienza dalle relazioni

Per le persone che affrontano avversità in età precoce, la grande domanda è la seguente: quanto riescono le circostanze successive a compensare gli effetti degli inizi difficili? I recenti studi ad Amboseli potrebbero dare qualche indizio. Non tutti i babbuini sfortunati hanno fatto una brutta fine; anzi, c'è una variabilità sufficiente per suggerire che alcuni animali riescano a cambiare il proprio destino. I ricercatori del progetto Amboseli hanno trovato indicazioni del fatto che la presenza di relazioni forti aiuti gli animali a combattere gli effetti dannosi delle avversità vissute in età precoce. L'effetto dell'essere nati durante una siccità, per esempio, è mitigato dall'avere una madre in posizione alta nella gerarchia. I rapporti di *grooming* tra femmine e maschi sono meno influenzati dalle avversità in età precoce rispetto a quelli tra le femmine, il che suggerisce la possibilità di un ammortizzatore. Le esperienze materne in età precoce hanno echi nelle generazioni successive. «Se tua madre muore e non aveva vissuto condizioni di avversità in età precoce, la tua sopravvivenza è compromessa, ma la situazione non è terribile rispetto ai cuccioli che hanno ancora la madre viva», dice Alberts. «Ma se tua madre muore e aveva vissuto condizioni di avversità da piccola, sei fritto».

Questi risultati collimano con precedenti lavori pionieristici effettuati ad Amboseli sul significato funzionale del legami sociali. A metà degli anni novanta il progetto aveva già dati completi (nascita, riproduzione, morte) su un centinaio di femmine di babbuino e raccoglieva i frutti dell'approccio a lungo termine di Altmann. La stessa Altmann e Alberts iniziarono a collaborare con l'antropologa evolutiva Joan Silk, oggi alla Arizona State University, per studiare quanta influenza avessero esattamente le relazioni sociali sulle prospettive di un animale in termini di successo riproduttivo.

Silk aveva trascorso un anno ad Amboseli per il post-dottorato. Tra la fine degli anni novanta e i primi anni duemila, quando alcuni primatologi iniziarono a dire che gli animali avevano amici, si chiese se fosse vero e che rilevanza avesse. Secondo l'idea convenzionale, la variabile critica nelle società gerarchiche di scimmie era la posizione nella scala di dominanza. Ma Silk era incuriosita dalle nuove prove che indicavano un collegamento tra rapporti sociali e salute negli esseri umani. Uno studio fondamentale pubblicato nel 1988 su «Science» dal sociologo James House, dell'Università del Michigan, aveva concluso che la mancanza di connessioni poteva avere effetti altrettanto dannosi quanto obesità e fumo.

Così Silk, Alberts e Altmann studiarono la base di dati di Amboseli. Alberts aveva già creato una metrica chiamata indice di socialità, che rifletteva la forza dei legami sociali in base a prossimità, rapporti di grooming e altri comportamenti sociali, cioè in base a quanto spesso le femmine interagissero in modo positivo tra loro. Le ricercatrici paragonarono quell'indice al numero di cuccioli so-

pravvissuti e, con sorpresa, scoprirono che l'integrazione sociale era un indicatore più accurato nel prevedere il successo riproduttivo rispetto alla posizione nella gerarchia di dominanza o a qualsiasi altra variabile presa in considerazione. Quel risultato, che Silk definisce «sbalorditivo», fu pubblicato nel 2003 su «Science».

Per essere sicura che il risultato non fosse limitato all'ambiente di Amboseli, Silk fece un'analisi simile assieme a Robert Seyfarth e alla compianta Dorothy Cheney, due biologi evolutivi dell'Università della Pennsylvania, sui dati provenienti dal loro progetto di ricerca sui babbuini nella Moremi Game Reserve, in Botswana. «Era impressionante quanto i risultati dei due studi fossero in convergenza», racconta Seyfarth. Nel 2014 altri studi condotti sia ad Amboseli che alla Moremi avevano ormai determinato che le connessioni sociali sono collegate non solo alla riproduzione ma anche alla longevità.

In generale gli effetti negativi di un'infanzia difficile tendono comunque a pesare di più rispetto a quelli positivi delle connessioni sociali tra i babbuini. Ma dato che le relazioni sociali hanno pur qualche potere protettivo nell'estendere la durata della vita, il gruppo di ricerca di Amboseli oggi si chiede, nelle parole di Archie: «L'amicizia può salvare qualcuno?». Se sì, probabilmente dipende da ragioni biologiche. «Che cosa succede a livello molecolare e fisiologico?», si chiede Tung, che si concentra sull'interazione tra geni e comportamento. «In che modo il comportamento sociale arriva sotto pelle e influenza il funzionamento del genoma?»

Applicare la scienza dell'evoluzione alla salute pubblica potrebbe dare indicazioni importanti per capire le cause delle malattie

Finora la scoperta più interessante di Tung, pubblicata nel 2016 su «Science», non è arrivata dai babbuini, ma da un branco di macachi rhesus in cattività. Il suo laboratorio alla Duke University ha manipolato lo status sociale degli animali creando e poi riorganizzando i gruppi di femmine. Quando hanno testato cellule di diversi esemplari per verificare come tollerassero un'infezione, i ricercatori hanno trovato evidenti differenze nella regolazione genica dell'immunità in base allo status sociale. «Probabilmente l'integrazione sociale e l'isolamento sociale hanno effetti diretti sul funzionamento del sistema immunitario», dice Tung.

Dato che non può manipolare i branchi di babbuini allo stato selvatico, ora Tung usa campioni di materiale fecale raccolti in bicchieri di plastica per cercare schemi simili. Il gruppo, guidato da Archie, lavora al sequenziamento dei microbiomi di quei 20.000 campioni. Finora i ricercatori hanno determinato che il microbioma dei babbuini è strutturato socialmente: gli esemplari dello stesso branco hanno microrganismi intestinali più simili; inoltre, all'interno dello stesso branco gli animali che hanno rapporti in cui si spulciano il pelo a vicenda sono più simili tra loro rispetto a quelli che non li hanno. Una volta terminato il sequenziamento, cercheranno aspetti del microbioma che possano prevedere salute, sopravvivenza o successo riproduttivo dell'animale.

Le nuove idee sulla plasticità di sviluppo derivate dal lavoro dell'Amboseli Baboon Research Project alimentano il dibattito e scaldano gli animi. Quando nel 2017 le scienziate hanno pubblicato una revisione della letteratura scientifica su «Evolution, Medicine, & Public Health», esso ha generato cinque interventi in risposta, compreso uno di Kuzawa che metteva in discussione la definizione usata di «età precoce», che secondo le ricercatrici va dal concepimento alla maturità riproduttiva. Altri commentatori sostengono che le autrici non abbiano prestato abbastanza attenzione al ruolo dei genitori come mediatori delle condizioni vissute in età precoce e alcuni non sono convinti che i modelli animali siano utili per pensare alle malattie negli esseri umani.

Ma quasi tutti concordano che applicare la scienza dell'evoluzione alla salute pubblica potrebbe dare indicazioni importanti per capire le cause delle malattie e sviluppare interventi. In una rassegna del 2017 su «The Lancet» si legge: «Non è esagerato ipotizzare che ciò potrebbe rivoluzionare la disciplina». Gli autori spiegano che questo metodo approfondirebbe la nostra comprensione del perché povertà e privazioni abbiano un impatto così forte su salute e durata della vita, e inoltre renderebbe più evidente il fatto che fattori come le cattive abitudini di salute non spiegano tutto. In fondo, dice Alberts, «i babbuini non hanno abitudini di salute».

Alla fine della mattinata che passiamo sul campo, Alberts e io ci arrampichiamo su uno spuntone di roccia al di sopra dei babbuini, da dove si vedono zebre e gnu che brucano l'erba in lontananza. Alberts riassume il progetto disegnando un grafico sul mio taccuino. Il grafico è composto da tre riquadri in fila. Sul primo scrive «EA» che sta per *early adversity*, avversità in età precoce, su quello di mezzo «ASC» per *adult social connectedness*, connessione sociale in età adulta, sul terzo «H + S» per *health and survival*, salute e sopravvivenza. Poi aggiunge due frecce tra i riquadri, entrambe che puntano verso destra, a indicare l'influenza delle avversità sulla connessione e della connessione sulla sopravvivenza. Basandosi su studi più recenti, aggiunge una terza freccia che descrive un arco al di sopra dei riquadri, collegando le avversità in età precoce con salute e sopravvivenza, saltando la connessione. Questa freccia rappresenta quanto le avversità siano più rilevanti dell'aiuto derivato dalle relazioni forti.

Le frecce sono importanti. Certo, le avversità in età precoce devono precedere la sopravvivenza, ma come si inserisce la connessione? Quanto più sani rende? È comunque possibile che gli individui più sani abbiano più probabilità di creare connessioni sociali fin dall'inizio.

Alberts mi restituisce il taccuino: «Credo che tutte queste frecce – dice – siano reali». Intende dire che ogni elemento esercita una sua influenza nel modo rappresentato sul foglio. Se ha ragione, la connessione sociale ha il potere di alterare il corso della vita di un individuo di fronte all'e avversità in età precoce. Anche se non dovesse essere vero, Alberts è convinta che i babbuini ci possano spiegare altre cose su di noi: «Quando un fenomeno che ci preoccupa negli umani ha radici evolutive, ha enormi conseguenze su come pensiamo di poter risolvere i problemi che ne derivano». ■

PER APPROFONDIRE

Baboon Metaphysics: The Evolution of a Social Mind. Cheney D.L. e Seyfarth R.M., University of Chicago Press, 2007.

Cumulative Early Life Adversity Predicts Longevity in Wild Baboons. Tung J. e altri, in «Nature Communications», Vol. 7, articolo n. 11181, 19 aprile 2016.

The Challenge of Survival for Wild Infant Baboons. Alberts S., in «American Scientist», Vol. 104, n. 6, pp. 366-373, novembre-dicembre 2016.

Il divario tra salute e benessere. Sapolsky R.M., in «Le Scienze» n. 606, febbraio 2019.

NEUROSCIENZE

La materia dei sogni

Esperimenti che hanno studiato l'attività cerebrale durante il sonno hanno permesso di identificare una regione del cervello responsabile della fase onirica

di Francesca Siclari

Registrazioni a occhi chiusi. Durante il sonno, l'attività cerebrale può essere registrata in vari modi, per esempio tramite l'elettroencefalogramma, che sfrutta elettrodi applicati sul cuoio capelluto.

Dan Dunkley/Science Photo Library/AGF

IN BREVE

L'esplorazione scientifica dei sogni è ricca di ostacoli sia per la natura intrinseca dei sogni (esperienze fugaci, spesso difficili da verbalizzare) sia per questioni tecniche (servono una risoluzione temporale di millisecondi e una risoluzione spaziale precisa dell'attività cerebrale).

Negli ultimi anni, però, alcuni progressi tecnici hanno migliorato le possibilità di ricerca. Così, esperimenti dell'autrice e suoi collaboratori hanno individuato una regione cerebrale che sarebbe un correlato neurale cruciale per l'esperienza cosciente nel sonno.

Oltre a fare luce sulla natura dei sogni, la scoperta offre una finestra sullo studio della coscienza, anche in contesti clinici. Per esempio in pazienti che non rispondono a stimoli esterni dopo un trauma cranico o soffrono di allucinazioni.

Francesca Siclari lavora come neurologa e specialista in medicina del sonno all'Ospedale universitario di Losanna, in Svizzera. Dirige un gruppo di ricerca che vuole capire come il cervello genera i sogni sia in condizioni normali sia in pazienti con disturbi del sonno (parasonnie).

Dove nascono i sogni? Come fa il nostro cervello, notte dopo notte, a produrre storie e immagini senza alcuno sforzo? È possibile, con le tecniche che abbiamo a disposizione, produrre una traccia materiale di un'esperienza immaginaria così sfuggente?

Quando Eugene Aserinsky e Nathaniel Kleitman, entrambi ricercatori dell'Università di Chicago, negli Stati Uniti, scoprirono il sonno REM, negli anni cinquanta, la risposta a queste domande sembrava a portata di mano. Registrando l'attività cerebrale con elettrodi disposti sul cuoio capelluto (tramite elettroencefalogramma), vicino agli occhi (elettro-oculogramma) e sui muscoli (elettromiogramma), i due scienziati osservarono per la prima volta nell'essere umano periodi di sonno assai particolari, ovvero periodi caratterizzati da un'attività cerebrale rapida così simile alla veglia che questo tipo di sonno venne anche chiamato «sonno paradosso».

Inoltre, gli stessi autori osservarono che durante queste fasi di attività cerebrale rapida gli occhi sotto le palpebre chiuse si muovevano in continuazione e molto velocemente, una caratteristica che portò a identificare questo stadio con la sigla REM (in inglese si riferisce all'abbreviazione di *rapid eye movements*, ovvero movimenti oculari rapidi). Infine, Aserinsky e Kleitman osservarono che l'attività dei muscoli durante questa fase si riduceva al minimo.

Incuriositi dalla scoperta, i due svegliarono i volontari dei loro esperimenti nel corso delle fasi REM, chiedendo se prima del risveglio stavano sognando o meno. In effetti era proprio così: nel 74 per cento dei casi, i volontari ricordavano alcuni loro sogni, mentre in altre fasi di sonno (chiamate non REM o NREM) questo accadeva solo nel 17 per cento dei casi. Non è sorprende quindi che, nella pubblicazione originale di questi risultati, i ricercatori dichiararono di aver scoperto «il metodo per determinare l'incidenza e la frequenza dei sogni».

Sogni indistinguibili

In seguito a questa straordinaria scoperta, molti scienziati iniziarono a ripetere l'esperimento. Si resero conto che se invece di chiedere ai volontari se avevano sognato o meno, domandavano «che cosa avevano avuto in mente prima del risveglio», allora per tutta risposta ottenevano racconti di sogni anche in altri stadi del sonno, fino al 70 per cento dei casi. In effetti, oggi sappiamo che di mattina i sogni del sonno NREM sono spesso indistinguibili da quelli del sonno REM.

Questa osservazione generò molta confusione nel mondo della ricerca sul sonno. Contrariamente a quello REM, il sonno NREM è caratterizzato da attività cerebrale assai meno rapida, con ampie onde lente che dominano il tracciato. Com'è possibile quindi che il cervello riesca a generare sogni ed esperienze in due stadi del sonno con attività cerebrale così diversa?

Le spiegazioni di questo dilemma non mancarono: alcuni ricercatori conclusero che non c'è legame tra attività cerebrale e sogno, altri sostennero che il sogno non avviene durante il sonno ma che si tratta di una confabulazione prodotta al risveglio, in un momento di confusione. Altri ancora sospettarono intrusioni nascoste di sonno REM nel sonno NREM che spiegherebbero la presenza di sogni anche in questo stadio.

Dormo o son desto?

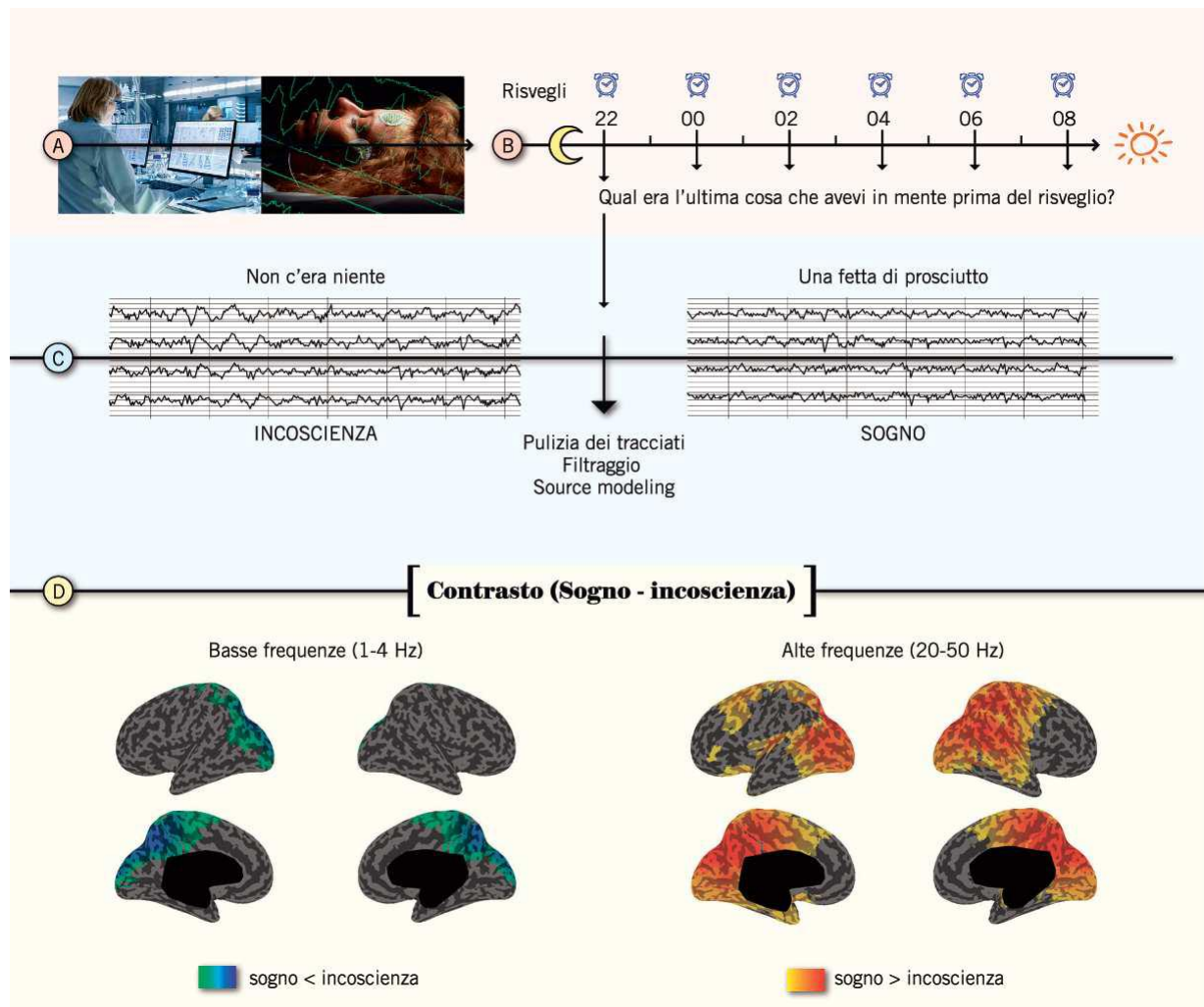
Questa incertezza ebbe come conseguenza che nel mondo della scienza i sogni vennero visti come una tematica oscura e controversa, difficile o impossibile da indagare. In effetti, gli ostacoli all'esplorazione scientifica dei sogni non mancano: sono esperienze fugaci che si dimenticano rapidamente, fatte di costruzioni mentali insolite, spesso talmente sorprendenti da essere di difficile verbalizzazione. A questo si aggiunge la necessità di risvegliare i volontari di notte per raccogliere le testimonianze dei sogni, che è spesso vissuta come disagevole sia da loro sia dagli sperimentatori. Infine, ci sono difficoltà anche a livello tecnico. Per una corretta caratterizzazione dell'attività cerebrale legata ai sogni, è necessaria una risoluzione temporale dell'ordine dei millisecondi e una risoluzione spaziale precisa per distinguere l'attività elettrica nelle diverse aree cerebrali. Fortunatamente, negli ultimi anni alcuni progressi tecnici hanno permesso di migliorare le nostre possibilità di ricerca nel sonno.

L'elettroencefalografia ad alta risoluzione, chiamata anche *high-density EEG* in inglese, è la tecnica che, grazie a 256 elettrodi montati su una cuffia, ha segnato un deciso miglioramento rispetto all'elettroencefalografia convenzionale. Oltre ad avere un'ottima risoluzione temporale (dell'ordine dei millisecondi), questa tecnica permette di visualizzare l'attività elettrica in diverse aree cerebrali con alta precisione, tramite algoritmi matematici che calcolano l'origine della sorgente che produce l'attività cerebrale (un processo chiamato *source modeling*). L'high-density EEG permette quindi di sapere quali zone della corteccia cerebrale sono attive in ogni preciso istante. Inoltre, la cuffia è ben tollerata dalle

Studiare il mondo onirico

Nel nostro esperimento i volontari dormono in un letto indossando il casco high-density e uno sperimentatore osserva il tracciato EEG in un'altra stanza (*A*). Durante la notte, lo sperimentatore sveglia diverse volte ogni partecipante tramite un allarme, ogni volta lo interroga via interfono sulle sue esperienze oniriche: «Qual era l'ultima cosa che avevi in mente prima del risveglio?» (*B*). I volontari riferiscono incoscienza o sogni (immagini oniriche). I sogni con contenuto dimenticato sono considerati a parte (i cosiddetti sogni bianchi). Dopo filtraggio e pulizia dei tracciati viene eseguita una procedura (*C*) chiamata *source modeling* (ricostruzione in sorgente), che permette di visualizzare l'attività cerebrale in forma di mappe del cervello.

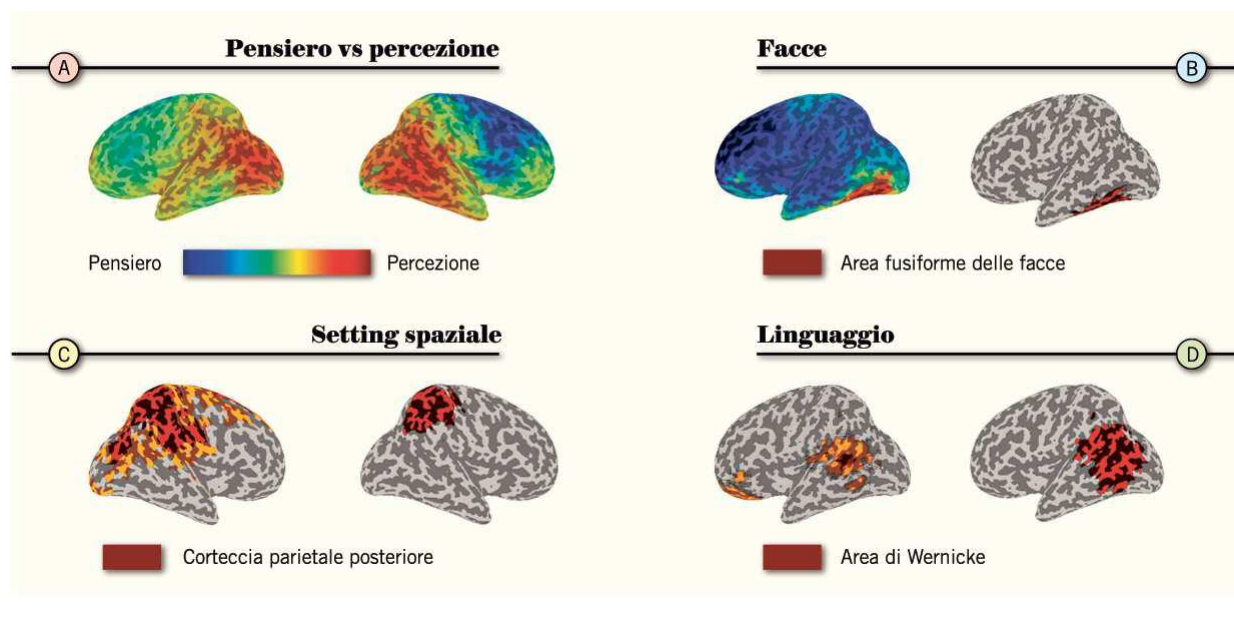
Le mappe (*D*) fanno vedere il contrasto tra sogni e incoscienza (media di tutti i tracciati e tutti i volontari) nel sonno non REM. (Le quattro mappe in alto mostrano una vista laterale del cervello; le quattro in basso, una vista mediale; quelle a sinistra, il lato sinistro; a destra, il lato destro). Rispetto all'incoscienza, i sogni sono associati a meno frequenze basse (in hertz, o Hz, *in blu*), che rappresentano le onde lente del sonno, nella zona calda posteriore, e più alte frequenze (*in giallo*) .

Illustrazione di Danilo Sossi; gorodenkoff/iStock (*ricercatrice*); SPL/AGF (*registrazione EEG*); fonte dati: *The neural correlates of dreaming*, di F. Siclari, G. Tononi e altri, in «Nature Neuroscience», Vol. 20, n. 6, pp. 872-878, 2017

persone che la indossano e permette di addormentarsi a letto senza disturbi.

Queste caratteristiche sono di particolare interesse perché negli ultimi anni varie linee di ricerca hanno dimostrato che il cervello non dorme in maniera omogenea. Mentre già da tempo si sapeva che i delfini possono dormire con un emisfero cerebrale alla volta, nell'essere umano il fenomeno del cosiddetto «sonno locale» è una scoperta piuttosto recente. Usando tecniche come l'high-density EEG e registrazioni intracraniche, effettuate cioè più vicine ai neuroni, si è visto che le onde lente che caratterizzano il sonno non sono generate nello stesso momento in tutte le aree cerebrali, ma possono essere confinate ad alcune parti ed essere assenti in altre. Questo vuole dire che, in alcuni momenti, certe parti del cervello possono essere considerate «sveglie» mentre simultaneamente altre zone «dormono». Un esempio estremo di uno stato ibrido tra sonno e veglia è il sonnambulismo, caratterizzato da risvegli incompleti che avvengono durante un sonno profondo.

Il contenuto dei sogni

Queste immagini, ottenute come risultato dei nostri esperimenti, mostrano le attivazioni cerebrali (incrementi in alte frequenze tra 25 e 50 hertz) associate a certi contenuti dei sogni nel sonno REM.
I sogni che contengono pensieri attivano le parti anteriori del cervello, i sogni con più elementi percettivi attivano le parti posteriori, come anche in veglia (*A*). I sogni che contengono volti mostrano più attività in alte frequenze nell'area fusiforme dei volti, specializzata appunto nella percezione delle facce in veglia, rispetto ai sogni senza facce (*B*). I sogni che hanno un setting spaziale (e per i quali i soggetti potevano precisare se il sogno si svolgeva all'interno o all'esterno di un ambiente), attivano la corteccia parietale posteriore destra, che ha un ruolo importante nell'attenzione visuo-spaziale in veglia (*C*). I sogni in cui i soggetti sentono parlare qualcuno attivano la zona della percezione del linguaggio, chiamata area di Wernicke (*D*).

Illustrazione di Danilo Sossi; fonte dati: *The neural correlates of dreaming*, di F. Siclari, G. Tononi e altri, in «Nature Neuroscience», Vol. 20, n. 6, pp. 872-878, 2017

Anche in condizioni fisiologiche sonno e veglia possono mescolarsi. Per esempio, alla fine di una notte di sonno alcune aree del cervello sono già sveglie, mentre altre aree cerebrali mostrano ancora le onde lente tipiche dello stato del sonno. E se questa disomogeneità riflettesse in qualche modo la presenza e le caratteristiche dei sogni?

Dormire in laboratorio

Al Wisconsin Institute for Sleep and Consciousness dell'Università del Wisconsin a Madison, diretto da Giulio Tononi, abbiamo cercato di rispondere a questa domanda con un progetto ambizioso. Abbiamo reclutato volontari in salute, che hanno accettato di condividere i loro sogni e di dormire in laboratorio. Nella prima parte dello studio, i volontari dovevano dormire a casa e dovevano annotare l'ultima esperienza che avevano avuto prima di ogni risveglio. All'inizio avevano trovato difficile memorizzare quest'ultima scena onirica; tuttavia dopo due settimane, a forza di ripetere il compito notturno, erano diventati sufficientemente esperti per passare alla fase successiva dell'esperimento: trascorrere la notte in laboratorio.

Gli esperimenti si svolgevano così: al loro arrivo di sera i volontari indossavano la cuffia dell'high density-EEG e poi andavano a letto in una stanza insonorizzata e priva di finestre: questi accorgimenti servivano a non disturbare il sonno in alcun modo e a ripetere l'esperimento in condizioni sempre uguali. Noi sperimentatori osservavamo il tracciato dell'attività cerebrale sullo schermo di un computer che si trovava in un'altra stanza. Ogni 15-30 minuti, uno di noi svegliava il volontario attivando un suono computerizzato e lo interrogava tramite un interfono sulle sue ultime esperienze oniriche. I racconti venivano registrati e trascritti (*si veda il box a p. 85*).

In cinque anni di esperimenti abbiamo effettuato quasi 1000 risvegli e trascritto centinaia di sogni. La varietà delle esperienze oniriche descritte dai volontari è sorprendente: una conversazione con un amico, un pensiero astratto, l'immagine nitida del ventre di un Buddha, il ricordo vago di un volto oppure l'ultima scena di storie lunghe e complesse come quelle tratte da un film, per citare alcuni esempi. Ma in alcuni casi i volontari non hanno riferito alcuna esperienza. Come se si fossero svegliati dal nulla, da uno stato di incoscienza. E questo non è successo esclusivamente durante il sonno profondo, ma anche nel sonno REM, sebbene molto più raramente.

Queste osservazioni ci offrono un'opportunità unica per lo studio dell'attività cerebrale legata alla coscienza. In effetti, il sogno può essere considerato come una forma di coscienza particolare, che emerge mentre siamo disconnessi dal mondo esterno. Durante i sogni, il cervello genera esperienze senza essere influenzato dagli stimoli ambientali. Sebbene siano immaginarie, le esperienze dei sogni sono per tanti aspetti molto simili a quelle che abbiamo durante il giorno quando siamo svegli: durante i sogni vediamo immagini, sentiamo voci, pensiamo e viviamo emozioni. E dato che durante il sonno in alcuni momenti la coscienza può

scomparire, abbiamo la possibilità di paragonare l'attività cerebrale in due condizioni molto diverse: stato di coscienza e stato di incoscienza. In altre parole, siamo in grado di investigare i correlati neuronali della coscienza.

Una zona calda

Paragonando l'attività cerebrale associata ai sogni con quella che precede i risvegli dallo stato di incoscienza (cioè assenza di esperienze), abbiamo trovato che durante i sogni l'attività cerebrale ha meno frequenze lente caratteristiche del sonno e ha più frequenze rapide. Sorprendentemente queste differenze non sono diffuse, ma localizzate in una regione posteriore del cervello che abbiano chiamato *posterior hot zone* (zona calda posteriore). Essa include le aree visive e altre regioni (come precuneo e cingolo posteriore) che integrano le esperienze sensoriali di modalità diverse in un'esperienza unica (*si veda il box a p. 85*). I risultati suggeriscono che per generare coscienza nel sonno non serve che tutta la corteccia sia attiva. La zona che conta per la coscienza dei sogni, la posterior hot zone, è relativamente ristretta.

Un'altra sorpresa è stata che l'attivazione di questa zona calda posteriore è associata ai sogni sia nel sonno NREM sia in quello REM. Il fenomeno permette di spiegare per la prima volta perché i sogni possono avvenire in due stati caratterizzati da attività cerebrali molte diverse dal punto di vista globale: non è tanto l'attività cerebrale globale a definire la presenza dei sogni, ma l'attivazione locale della zona calda posteriore.

Non siamo molto lontani dal poter visualizzare i contenuti dei sogni in tempo reale

La zona calda posteriore ha mostrato meno attività nelle basse frequenze anche quando i volontari non ricordavano il contenuto del sogno, ma avevano chiaramente l'impressione di avere sognato. Questo sembra suggerire che i cambiamenti nello spettro delle onde lente nella zona calda posteriore determinino presenza e assenza di sogni, ma non la capacità di ricordarsi del contenuto dei sogni. Abbiamo visto invece che i sogni ricordati, rispetto ai sogni dimenticati, erano associati con attivazioni in zone diverse del cervello, che hanno un ruolo nella memoria.

Infine, abbiamo osservato che alcuni contenuti dei sogni nel sonno REM sono associati ad attivazioni ben definite, simili a quelle osservate quando si percepiscono gli stessi contenuti durante la veglia (*si veda il box nella pagina a fronte*). A titolo di esempio, quando i nostri volontari sognavano volti si attivava l'area fusiforme dei volti, che si attiva anche quando ne percepiamo uno durante la veglia. Abbiamo trovato corrispondenze simili per altri contenuti, come la percezione del linguaggio, lo spazio e il movimento. Anche se questo può sembrare scontato, è un passo importante: dimostra che i racconti dei sogni riflettono effettivamente esperienze che avvengono durante il sonno, e che quindi non sono, come invece sostenuto da tanti, confabulazioni che emergono al risveglio.

In un ultimo esperimento abbiamo voluto capire se fosse possibile prevedere in tempo reale se i nostri volontari sognavano. Monitorando l'attività della zona calda posteriore abbiamo svegliato i volontari ogni volta che essa superava un certo rapporto tra alte e basse frequenze durante il sonno NREM. Se il rapporto era molto alto ci aspettavamo che il soggetto stesse sognando, mentre se era molto basso la nostra previsione era che fosse in stato di incoscienza. In questo modo siamo riusciti prevedere la presenza di sogni e di incoscienza correttamente nell'87 per cento dei casi.

Film da sogno

Il nostro lavoro ha risposto a diverse domande nel campo dei sogni, ma ne ha anche sollecitate altre: un giorno la zona calda posteriore ci permetterà di prevedere se qualcuno è cosciente non solo nel sonno, ma anche in altri stati di coscienza alterata, come nel coma o in anestesia generale? Come si attiva la zona calda posteriore? Come sono scelte le immagini proiettate su questo schermo dei sogni e qual è la loro funzione? Sarà possibile prevedere non solo grandi categorie di contenuti dei sogni, ma sogni interi?

Alcuni esperimenti cercano di rispondere a questi interrogativi. Uno studio pubblicato nel 2013 su «Science» e diretto da Yukiyasu Kamitani del Nara Institute of Science and Technology, in Giappone, ha dimostrato che non siamo poi così lontani da poter visualizzare i contenuti dei sogni in tempo reale. Basandosi sulle attivazioni nelle aree visive (comprese anche nella zona calda posteriore) e sfruttando tecniche di apprendimento automatico, il gruppo di Kamitani ha decifrato che cosa sognavano i volontari mentre si addormentavano in una risonanza magnetica funzionale, e ha ricostruito i sogni individualmente in forma di video.

Un video mostra una serie di immagini di lettere, numeri e calligrafie orientali che si succedono, poi appare il rapporto del sogno, dato dal soggetto: «Vedevo una specie di caratteri. C'era qualcosa che somigliava a una carta da lettera, per comporre un tema, e guardavo i caratteri del tema, o quello che era. Era in bianco e nero, e questa carta era l'unica cosa che c'era. Poco prima ho visto un film in cui c'era una persona, ma non ricordo più bene.» Questo esempio dimostra che quindi, grazie all'intelligenza artificiale, è possibile prevedere i contenuti dei sogni, in termini di grandi categorie, mentre ci si addormenta.

A fronte dei progressi nelle tecniche di analisi dei dati, è molto probabile che in un futuro non troppo lontano questo tipo di filmato, in modo perfezionato, potrà essere ottenuto più facilmente in diversi stadi del sonno e anche in veglia. Un simile progresso non soddisferebbe solo la nostra curiosità di poter leggere sogni e pensieri, ma potrebbe avere anche implicazioni cliniche importanti: visualizzare che cosa avviene nella mente di una persona che non risponde agli stimoli dopo un trauma cranico, per esempio, forse ci aiuterà a capire se è cosciente o in coma, e a orientare al meglio le cure. Questo tipo di dati offre anche nuove possibilità per capire come il cervello genera la sua realtà: che cosa cambia quando si vive una realtà interna, come il sogno, rispetto a quella esterna, quando si è svegli? E che cosa succede quando la realtà interna entra in conflitto con le percezioni esterne, come avviene in pazienti che soffrono di disturbi psichiatrici con allucinazioni? Forse la scienza dei sogni potrà fornire un nuovo punto di partenza, per adesso poco esplorato, per questo tipo di domande. ■

PER APPROFONDIRE

The Neural Correlates of Dreaming. Siclari F., Tononi G. e altri, in «Nature Neuroscience», Vol. 20, n. 6, pp. 872-878, giugno 2017.

Local Aspects of Sleep and Wakefulness. Siclari F., Tononi G., in «Current Opinion in Neurobiology», Vol. 44, pp. 222-227, giugno 2017.

Neural Decoding of Visual Imagery During Sleep. Horikawa T., Kamitani Y. e altri, in «Science», Vol. 340, n. 6132, pp. 639-642, 3 maggio 2013.

La decifrazione dei sogni in tempo reale: **http://is-edge.naist.jp/Edge/2014/02/neural-decoding-of-visual-imagery-during-sleep.**

di Paolo Attivissimo

giornalista informatico e studioso
della disinformazione nei media

Una porta chiusa per millenni

In un'area desertica degli Stati Uniti sarà vietato scavare per i prossimi 10.000 anni: il problema è comunicarlo

Da decenni un gruppo molto eterogeneo di esperti lavora a un compito a prima vista molto semplice: scrivere istruzioni chiare che facciano capire a chiunque che in uno specifico luogo del deserto del New Mexico non bisogna assolutamente scavare. Il problema è che questo messaggio deve durare almeno 10.000 anni.

In quel luogo, infatti, vengono sepolte le scorie radioattive accumulate dalle attività militari e civili degli Stati Uniti. Il Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) è una gigantesca caverna artificiale, situata in un sottosuolo fra i più geologicamente stabili al mondo, che verrà riempita di scorie incapsulate e poi sigillata. Il suo contenuto resterà altamente radioattivo per millenni, quindi è indispensabile avvisare le future generazioni di questo pericolo letale.

Ma come si fa a tramandare un messaggio per 10.000 anni? Nessuna forma di scrittura conosciuta è neanche lontanamente così antica: i primi geroglifici hanno circa 5000 anni. Fra 100 secoli tutte le lingue parlate di oggi si saranno trasformate in modo irriconoscibile. Qualunque riferimento culturale sarà travisato, distorto, dimenticato. Diecimila anni fanno sembrare le grandi piramidi egizie un tempietto provvisorio. Potranno avvenire innumerevoli guerre, epidemie, rivoluzioni sociali, con conseguenti progressi o regressi. Eppure è con questa scala di tempi sovrumana che si devono cimentare gli estensori del *Permanent Markers Implementation Plan* dello statunitense Department of Energy.

Semplicità e ingegnosità

Le soluzioni proposte dagli esperti sono ingegnose nella loro semplicità: costruire non un edificio, ma un grande terrapieno perimetrale, la cui forma comunichi la sua natura artificiale e i cui materiali possano reggere la sfida del tempo senza essere tanto preziosi da incoraggiare demolizioni o vandalismi. In questo terrapieno saranno sepolti magneti e riflettori radar passivi, per indicare alle culture tecnologiche la natura anomala della struttura. Intorno sorgeranno colonne di granito alte circa 15 metri, conficcate profondamente nel suolo e recanti avvertimenti ripetuti, incisi in inglese, spagnolo, russo, francese, cinese, arabo e navajo, di non scavare per non far uscire dal terreno un veleno invisibile e di incidere versioni aggiornate di questi moniti nelle lingue che via via nasceranno nei millenni successivi. Niente alta tecnologia, insomma, ma una versione moderna della stele di Rosetta.

Le istruzioni testuali saranno accompagnate da una forma di comunicazione ancora più elementare, che trascende lingua e tempo: sculture di espressioni del viso che rappresentano universalmente paura e malessere.

Finale incerto

Al centro di questa struttura sorgerà inoltre un edificio che presenterà, sempre tramite incisioni nella pietra, i dettagli del deposito sotterraneo e un ingegnoso indicatore del tempo che deve passare prima che svanisca il pericolo: una rappresentazione della migrazione del Polo Nord celeste, la cui variazione nel corso dei millenni è calcolabile in anticipo con precisione ed è un orologio naturale sicuramente al riparo da ogni interferenza umana. Anche qui, l'evoluzione delle stelle sarà accompagnata da sculture di espressioni umane: allarme e paura alla data della chiusura di WIPP, minore preoccupazione dopo 10.000 anni e serenità molto dopo questo periodo.

Non c'è modo di sapere se queste tecniche funzioneranno o evocheranno curiosità irresistibile, come accade per le maledizioni incise nei monumenti antichi e ignorate in cerca di tesori. Ma di meglio non c'è, e il fatto stesso di dover pensare a rimedi che durano decine di millenni per proteggere i nostri discendenti la dice lunga sull'entità del danno che abbiamo causato in così poco tempo al nostro pianeta.

di Beatrice Mautino

biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti *Il trucco c'è e si vede* (Chiarelettere, 2018)

Quando uno non vale uno

Le formulazioni cosmetiche non sono la semplice somma degli ingredienti, sono invece prodotti complessi

"Tutto ciò che ho visto di fronte a me erano ettari di pelle... mi sono sentito come un agricoltore che vede per la prima volta un campo fertile.» Albert Montgomery Kligman è passato alla storia per questa frase raccolta dal «The Evening Bulletin» di Philadelphia nel 1966 nel corso di un'intervista sulla sua attività di ricerca nella prigione di Holmesburg, in Pennsylvania. Lì, per una ventina d'anni, dal 1951 al 1974, Klingman ha effettuato esperimenti usando i detenuti come cavie. Erano loro gli ettari di pelle a cui faceva riferimento.

Stimato dermatologo, scopritore di una delle terapie più efficaci per il trattamento dell'acne, la tretinoina, poi brevettata con il nome commerciale di Retin-A, inventore di termini oggi usatissimi come «fotoinvecchiamento» e «cosmeceutico», Kligman all'epoca lavorava per conto di una trentina di grandi aziende e del governo statunitense per studiare gli effetti sulla pelle dei prodotti più disparati, dai deodoranti agli shampoo, dagli allucinogeni alla diossina, sollevando non poche perplessità etiche.

Klingman si è sempre difeso appellandosi alle norme accettate al tempo, ma negli anni successivi quelle ricerche hanno prodotto denunce, processi e, più in generale, una revisione dei regolamenti federali per limitare gli studi medici nelle carceri.

A caccia di comedoni

Il suo lavoro ci interessa, però, per un'altra faccenda, meno nota e controversa, ma ugualmente peculiare. Nel 1972, con il collega Otto Mills, Kligman introduce il concetto di «acne cosmetica», derivante, cioè, dall'uso di determinati ingredienti cosmetici. Quali? Quelli che rispondevano al test messo a punto nel corso degli anni da Klingman stesso.

Il suo protocollo pubblicato nel 1979 su «The British Journal of Dermatology» è stato uno dei più usati della storia della dermatologia. Il REA o Rabbit Ear Test, il saggio dell'orecchio del coniglio, consisteva nell'applicare una sostanza sull'orecchio di un coniglio due volte al giorno per cinque giorni a settimana per un periodo complessivo di due settimane per poi andare a vedere se la sostanza era «comedogenica», cioè provocava punti neri, brufoli o altri tipi di imperfezioni della pelle.

Gli esperimenti di Kligman e collaboratori hanno prodotto tabelle con punteggi di comedogenicità per tutti gli ingredienti più usati. Se ne salvavano pochi, tanto da far venire il sospetto che il test non fosse poi così affidabile. La pelle dell'orecchio del coniglio è particolarmente sensibile e il rischio di avere falsi positivi, cioè ingredienti che non sono comedogenici ma lo sembrano, è molto alto.

La revisione del test

Nel 1996, lo stesso Kligman ha rivisto il suo protocollo tramite un esperimento proprio con l'ingrediente più controverso di tutti, la vaselina. Il dermatologo ha spalmato vaselina pura sulla pelle di una decina di persone affette da acne ogni giorno per otto settimane e il titolo dello studio ne riassume bene i risultati: La vaselina non è comedogenica. Una revisione critica del saggio dell'orecchio del coniglio e del concetto di acne cosmetica.

Negli anni successivi si è poi scoperto che un ruolo molto importante nel determinare gli effetti comedogenici di un ingrediente sono la sua concentrazione nel prodotto finale, la sua provenienza (gli estratti naturali tendono a portarsi dietro più impurità degli ingredienti di sintesi), ma anche la combinazione degli ingredienti nella formula.

Insomma, le formulazioni cosmetiche, come le torte, non sono la semplice somma degli ingredienti, ma sono prodotti complessi e demonizzare un ingrediente perché ha avuto risultati pessimi in un test sbagliato potrebbe non essere una buona idea. Eppure, come ben sappiamo, le cattive idee sono dure a morire.

di Dario Bressanini

chimico, divulgatore, gastronomo. Autore di *Contro natura* (Rizzoli, 2015), *La Scienza della Carne* (Gribaudo, 2016)

Aglio di giada

Le feste del Capodanno cinese sono accompagnate anche da uno snack popolare dai colori inquietanti

Quando un alimento, a seguito di un trattamento, cambia improvvisamente colore e assume tonalità inusuali, spesso viene visto con sospetto e gettato via. Pensate al colore nero-verdastro, innocuo, che assume il tuorlo di un uovo sodo cotto per troppo tempo. Anche l'aglio tritato oppure ridotto a *purée* può assumere in breve tempo una colorazione verde o blu sicuramente inquietante.

In alcuni paesi invece questi cambiamenti di colore sono ricercati. È il caso dell'aglio Laba: un popolarissimo snack consumato durante le festività del Capodanno cinese. Sono spicchi d'aglio sott'aceto di colorazione verde-blu e, specialmente nel nord della Cina, sono consumati tra una portata e l'altra, per «pulire il palato».

Come prepararlo

La colorazione è il risultato di una serie complicata di reazioni chimiche non ancora comprese del tutto. Nel primo passaggio l'alliina, una molecola contenente zolfo, viene convertita da un enzima in allicina, la molecola principale dell'odore di aglio che percepiamo quando lo schiacciamo o lo tagliamo. L'aglio non è particolarmente ricco di proteine, tuttavia contiene vari amminoacidi liberi, che sono fondamentali nella seconda fase della reazione per produrre il colore: alcuni amminoacidi liberi, come l'alanina, si legano all'allicina e agli altri prodotti della reazione enzimatica per formare una molecola incolore che reagendo ulteriormente genera vari composti colorati, dal rosso al blu al giallo, simili strutturalmente alla clorofilla. Nell'aglio si producono sia i composti gialli sia quelli blu, dando quindi una colorazione dal verde al blu a seconda della percentuale dei due componenti.

Nella preparazione tradizionale l'aglio viene lasciato al freddo – è una preparazione invernale – per settimane, anche più di un mese. In questo periodo l'alliina che poi produrrà i pigmenti si accumulerà nelle cellule. Voi potete lasciarlo in frigorifero. Gli spicchi sono poi separati, pelati senza danneggiarli, lavati e asciugati, tagliando solo un po' la radice. Si mettono infine in un recipiente a chiusura ermetica coperti d'aceto, aggiungendo opzionalmente un po' di zucchero e un po' di sale. Chiudete e lasciate a temperatura ambiente. Dopo qualche giorno dovreste vedere sfumature verdastre o bluastre sugli spicchi. Non è sicuro che in effetti vi riesca perché ci sono fattori che ancora non sono ben compresi, ma se riuscirete a ottenere uno spicchio d'aglio verde bluastro, anche se magari non avrete il coraggio di assaggiarlo, rimarrete comunque ammaliati dal suo color giada.

Il sapore ha note sia acide sia dolciastre, non è così pungente come quello dell'aglio crudo perché via via che si forma la colorazione verdastra si consumano alcune molecole solforate responsabili del sapore pungente, e contemporaneamente si formano alcuni zuccheri e altre sostanze aromatiche.

Le condizioni migliori

Uno studio pubblicato nel 2018 da un gruppo di scienziati cinesi ha indagato le condizioni migliori per ottenere l'aglio Laba. Sembra che 12 giorni di maturazione in aceto siano ottimali per ottenere un bel colore verde intenso, che poi si trasformerà in giallo con l'andar del tempo perché il pigmento blu viene degradato. Anche il sapore è ottimale dopo circa due settimane e l'acido acetico è fondamentale per il processo perché rende permeabili le membrane intracellulari permettendo all'enzima di trasformare l'alliina in allicina, che poi produrrà i pigmenti colorati.

Ci sono molte preparazioni, anche domestiche, in cui l'aglio è sminuzzato oppure ridotto in poltiglia e spesso può accadere che nel giro di poche ore assuma una colorazione verde o blu. Non spaventatevi se accade, il meccanismo chimico è lo stesso.

Per un palato pulito. L'aglio Laba è composto da spicchi sott'aceto dalla colorazione verde-blu. In Cina, specialmente nel nord del paese, è consumato soprattutto tra una portata e l'altra.

Di HelloRF Zcool/Shutterstock

Due gatti si dividono un'aiuola circolare senza entrare in conflitto, ma la situazione di stallo potrebbe sbloccarsi all'arrivo di Gaetanagnesi

Equilibrio felino del terrore

C'è forse qualcosa al mondo che ispiri sentimenti di pace e armonia più dell'arrivo della primavera? Quando le prime gemme colorano i rami ancora spogli degli alberi, le aiuole cominciano a tingersi d'un verde tenue e timido, e già si intravedono accenni di giallo e di blu portati dai primi, coraggiosi fiori di campo? Certo no, a patto che ci si limiti agli effetti che la lieta stagione induce sulla flora; un po' meno certo se si mettono nel conto anche quelli relativi alla fauna.

Usciti sul balcone di casa per godersi la brezza gentile dello stagionale risveglio della natura, Rudy e Piotr si sono presto ritrovati ipnotizzati dal clima guerresco che saliva dal giardino, e precisamente dalla grande aiuola circolare che ne costituisce l'elemento più caratteristico.

«Guarda bene, Doc – bisbiglia Rudy – è in atto proprio quanto ti accennavo ieri sera sull'etologia felina!»

«Guarderò bene, GC, lo giuro – risponde altrettanto sommessamente Piotr – ma non posso che ripeterti quanto già detto proprio ieri: ovvero che se mi spiattelli una parola derivante da *ethos* associata a qualcosa riguardante i gatti, il commento che mi viene in mente è composto da un'unica, sola parola: la vuoi in greco o in italiano?»

«Puoi anche dirmela in uralo-altaico, tanto so benissimo a che cosa ti riferisci.»

«Spiritoso. Mi riferivo a "ossimoro", comunque. I gatti non hanno etica, e l'etologia felina è pertanto assimilabile allo studio dei cristalli di ghiaccio all'interno del Sole.»

«Non dire sciocchezze, e non confondere etica e morale, Doc. Sostengo anzi che i gatti siano gli esseri viventi più razionali del pianeta, e che i loro comportamenti siano quelli meglio analizzabili matematicamente. Hai visto quelle due belve, là sotto? Non noti niente di rilevante?»

Piotr scocca a Rudy uno sguardo trasudante sufficienza: «Ho notato tutto quanto c'è da notare: due grossi felini che si guardano in cagnesco, se mi passi la facile battuta. Quello tigrato è il mostro del farmacista, e quello rosso è la belva che convive con il commercialista.»

«Tutto qui?», sbuffa Rudy; «E delle cose davvero significative non mi dici niente?»

«Vuoi i dettagli, i pettegolezzi? Ebbene, il farmacista sta rischiando il fallimento perché regala le medicazioni per le ferite che causa il suo gatto. Il commercialista riceve proposte dalle facoltà di biologia per avere il permesso di studiare quel coacervo di cellule scarsamente organizzate fortunosamente sopravvissute alla Mannaia Darwiniana, ma...»

«Tutte sciocchezze. Quando imparerai a vedere le cose importanti? Non vedi che è in atto un perfetto "equilibrio del terrore", come quello che mezzo secolo fa bloccava Stati Uniti e URSS? Analizza la situazione, perfettamente e matematicamente stabile, che si è realizzata: si sono piazzati nell'aiuola circolare, su un diametro, alla distanza di un terzo di diametro dal bordo e tra di loro...»

Illustrazione di Stefano Fabbri

«Aspetta, un terzo più un terzo più un terzo... sì, fa uno, fin qui ci arrivo. Ma perché dici che è stabile?»

«Perché in questo modo ciascuno dei due controlla esattamente metà dell'aiuola, c'è equilibrio. Non hanno intenzione di muoversi, perché (a meno che non si muovano di concerto lungo un cerchio mantenendo ferma la distanza reciproca) muovendosi le aree di competenza si sbilancerebbero, e questo porterebbe allo scatenarsi della furia felina.»

«Uh. Ma mica potranno continuare a star fermi in eterno, no?»

«Beh, Stati Uniti e URSS ci sono stati per un bel po' di anni... ma certo, era una stabilità fragile. E lo è anche questa: basta un niente, una variazione infinitesimale, magari un evento esterno, come... la gattaiola!»

di Rodolfo Clerico,
Piero Fabbri e
Francesca Ortenzio

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve a maggio e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

IL PROBLEMA DI MARZO

Il mese scorso il problema verteva sulla determinazione del numero di sequenze (spiedini) costruibili con n elementi di due tipologie (carne e verdure), eliminando quelle composte unicamente da sottosequenze uguali. La domanda finale chiedeva se questo numero fosse sempre divisibile per 6.
Il numero a_n di tutte le sequenze di lunghezza n è 2^n. Se una sequenza di lunghezza n è composta unicamente da sottosequenze uguali di minima lunghezza d, si avrà che d è un divisore di n e che la sottosequenza sarà già comparsa tra quelle relative alla sequenza di lunghezza d. Il numero di tutte le sottosequenze di lunghezza d per tutti i d che dividono n è 2^n, cosa facilmente verificabile per $n = 3$ (i divisori di 3 sono 1 e 3: $a_1 = 2$; $2^3 = a_1 + a_3 = 2 + a_3$; e a_3 è divisibile per 6), mentre il caso generale è dimostrabile per induzione.
Supponendo che a_k, per ogni k tale che $2 < k < n$, sia divisibile per 6, se n è dispari, va dimostrato che $a_1 + a_n$ è congruo a 2^n modulo 6; se n è pari, va dimostrato che $a_1 + a_2 + a_n$ è congruo a 2^n modulo 6 (gli altri termini sono sempre divisibili per 6 per ipotesi). Visto che $a_1 = a_2 = 2$, possiamo ricavare le espressioni in modulo di a_n ($2^n - 2$ e $2^n - 4$) per le quali (essendo numeri pari) basta mostrarne la divisibilità per 3. Poiché le potenze n–esime di 2(modulo 3) sono congrue a 2 per n dispari e a 1 per n pari, le due congruenze sono verificate, e con esse la perdurante divisibilità per 6.

«Che urli, adesso? E che c'entra la gattaiola? Stiamo parlando di...»

«La nostra gattaiola! Controllala! È aperta? Treccia si è raccomandata di tenerla chiusa, ha minacciato morte e distruzione se...»

«Per la miseria – biascica Piotr – è... indubbiamente aperta».

«E quella che sta avvicinandosi all'aiuola è indubbiamente Gaetanagnesi. Siamo due uomini morti, Doc.»

Piotr deglutisce a fatica. «Sì, morti. Se Gaetanagnesi finisce in mezzo a quelle due belve e torna a casa con mezza vibrissa fuori posto, noi saremo trasformati in bocconcini per gatti da Alice, non c'è dubbio.»

Rudy aggrotta le sopracciglia e scruta ansioso il giardino: «Però, forse, l'equilibrio potrebbe ancora resistere...»

«Seeh... con un terzo gatto che entra nell'aiuola? E che per entrarci deve ovviamente muoversi? Ma figurati... o forse dici così perché credi che i due mostri maschi tollereranno la nostra micetta femmina?»

«No, dico così perché la nostra micetta femmina è il matematico migliore di questa casa, e se c'è qualcuno in grado di entrare nell'aiuola senza rompere l'equilibrio di controllo tra i due gatti maschi, e magari arrivare perfino a un'altra situazione stabile e fissa in cui ognuno dei tre felini controlli un terzo dell'aiuola, quella è lei. E dire che io non ho ancora finito di calcolare esattamente come e dove andrà a sistemarsi...»

«Quante volte devo ripetervi che in questi giorni la gattaiola deve rimanere chiusa?»

La voce che arriva dall'interno della casa è solo moderatamente irritata, ancora; quello di Alice è uno stanco sorriso, mentre si affaccia alla portafinestra e ripete per l'ennesima volta: «Non voglio essere noiosa, ma ve l'ho detto tante volte che in primavera il giardino si popola di gattacci che potrebbero...»

Sono due facce coloro fango a metterla in allarme. Guidata da un istinto a mezza strada tra il femminile e il materno, Alice si sporge per controllare il giardino. Subito dopo, con il volto a mezza strada tra il bianco latte e il rosso fuoco, rientra in casa, tira fuori due ciotole dal sottolavello, una confezione gigante di croccantini dal pensile e il coltello più grande e lungo dal cassetto delle posate.

«Ma dai, Treccia, non è il caso... – mormora Rudy – io penso che Gaetanagnesi riesca a evitare la zuffa. Guarda, i due maschi non hanno la minima intenzione di spostarsi, scommetto che riusciranno a trovare un *gentlecats agreement*, anche se non ne sono ancora sicuro e...»

«...e poi dai, Treccia – interviene Piotr – capisco il senso di protezione, ma attirare quei due poveri gatti con le crocchette per ammazzarli a coltellate non è cosa da te, diamine!»

«Su questo sono d'accordo», risponde Alice con un tono di voce così gelido che la Guerra Fredda, in confronto, aveva una temperatura paragonabile a quella di Sirio: «E infatti per i due gatti riservo solo ciotole e croccantini...».

Un solo istante di pausa, mentre dagli occhi azzurri esce un veloce e terribile lampo: «... il coltello mi serve per due deficienti di un'altra specie.»

I misteri più stranianti della natura

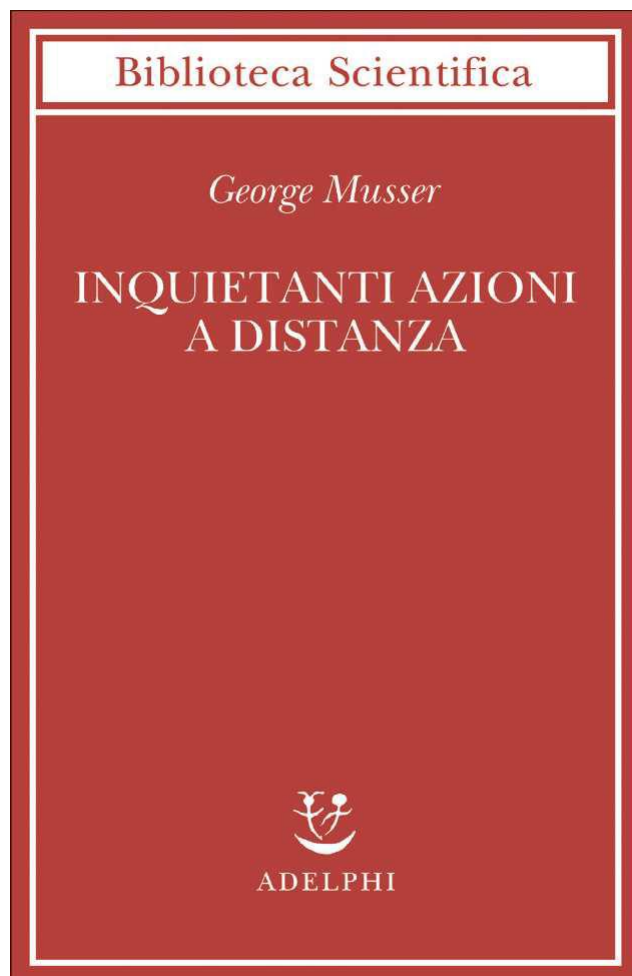
Dalle particelle ai buchi neri, le conseguenze spaventose della non località

Inquietanti azioni a distanza
di George Musser
Adelphi, Milano, 2019, pp. 348, (euro 28,00)

L'aggettivo *spooky* che compare nel titolo dell'edizione originale di questo libro significa inquietante ma anche spaventoso, spettrale. E forse aiuta ancora meglio a capire le reazioni che la maggior parte dei fisici ha avuto nell'ultimo secolo di fronte alle azioni a distanza. È l'esperienza vissuta dallo stesso George Musser quando era studente o da ricercatori, come Tim Maudlin, citati nel libro e ai quali è capitato di imbattersi in dibattiti sul tema leggendo un articolo di «Scientific American», senza averne mai sentito fare menzione prima nelle aule dell'università.

Sappiamo che la fisica del Novecento, in particolare la meccanica quantistica, ha assestato un colpo fatale alla nostra visione ingenua e intuitiva della natura, costringendoci ad accettare l'esistenza di fenomeni fisici, come il dualismo onda-particella, che fatichiamo ancora oggi a digerire. Ma di fronte a fenomeni come l'*entanglement,* o correlazione quantistica, parlare di sfida al senso comune diventa quasi un eufemismo. La meccanica quantistica prevede la possibilità che la misurazione dello stato quantico di una particella influenzi istantaneamente quello di una particella distante. Un fenomeno che ha un sapore di magia. E infatti per buona parte del secolo scorso la cosiddetta «non località» è stata trattata alla stregua di un fenomeno da circo che inevitabilmente doveva avere una spiegazione più profonda, e ancora oggi i fisici sono avviluppati in uno sfibrante e apertissimo dibattito, avviato negli anni trenta dal confronto senza risparmio di colpi tra Albert Einstein e i fisici, come Niels Bohr ed Erwin Schrödinger, che avevano contribuito a costruire la meccanica dei quanti.

Per chi la studia, precisa sin dall'inizio l'autore, la non località è la madre di tutti i rompicapi della fisica. D'altronde mette in discussione i presupposti che hanno accompagnato finora l'evoluzione della conoscenza fisica. «Individuando la località come prerequisito essenziale alla comprensione della natura, Einstein ha cristallizzato 2000 anni di pensiero scientifico e filosofico», sottolinea Musser. Che in questo libro ricostruisce la lunga storia delle azioni a distanza, dall'antica Grecia passando per Isaac Newton fino alla fisica del Novecento e ai tentativi di conciliare relatività generale e fisica dei quanti. E poi raccoglie storie e sforzi teorici e sperimentali dei fisici persuasi che dalla non località possa nascere una nuova rivoluzione nella comprensione della natura. A partire dalla concezione dello spazio, che dovrebbe essere meglio inteso come una proprietà emergente, come uno solo degli stati possibili dell'universo (un po' come il ghiaccio per l'acqua).

Musser, *contributing editor* di «Scientific American» e già autore di un libro sulla teoria delle stringhe, ci fa capire che esistono – oltre al fenomeno dell'entanglement – diversi tipi di non località, che riguardano i buchi neri o la distribuzione delle galassie nell'universo. Ci racconta che questi fenomeni così apparentemente assurdi giocano un ruolo persino in processi fondamentali per la vita come la fotosintesi delle piante. Ci fa entrare nei laboratori di Anton Zeilinger, autore dei primi esperimenti sul teletrasporto quantistico, e forte sostenitore del dialogo tra scienza e filosofia, ci fa conoscere da vicino fisici teorici dalla personalità assai vivace come Nima Arkani-Hamed dell'Institute for Advanced Study di Princeton che ha provato a riformulare i celebri diagrammi di Feynman – icona della fisica delle particelle novecentesca – perché troppo ancorati alla località.

E ci fa vivere la continua altalena tra entusiasmo e depressione di chi prova a sondare i misteri più stranianti della natura.

Marco Motta

Rompicapi da iniziazione

Un libro di problemi per avvicinarsi alla matematica ricreativa

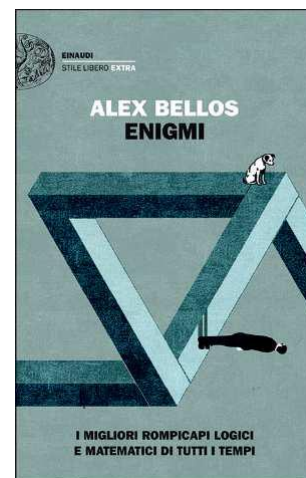
Il sottotitolo che segna questo libro, *I migliori rompicapi logici e matematici di tutti i tempi*, è assai impegnativo; non solo perché ipoteca il futuro, come accade sempre quando ci si sbilancia in affermazioni che contengono l'espressione «di tutti i tempi», ma soprattutto perché, al pari delle opere d'arte, anche per i problemi di matematica è difficile trovare unanimità di giudizio.

A difesa di Alex Bellos – l'autore britannico che prima di dedicarsi alla narrazione matematica scriveva le lodi del calcio brasiliano – si registra che il sottotitolo originale è più modesto e si sbilancia solo fino a definire «totalmente appaganti» i problemi proposti; e che i 104 enigmi del volume spaziano davvero dai più antichi e classici ai più recenti exploit reperibili su Internet.

La struttura del libro è quella classica, con la prima metà dedicata all'esposizione dei problemi e la seconda destinata alle soluzioni: tuttavia Bellos mantiene uno stile moderno e intrigante sia nella prima sia nella seconda parte, forte dell'abilità narrativa che si è formato tenendo una rubrica sul quotidiano britannico «The Guardian» e nei suoi libri pubblicati in precedenza, e spesso premiati.

I problemi sono raggruppati in cinque sezioni (logici, geometrici, pratici, «con oggetti» e «per puristi») e queste sono trattate indipendentemente l'una dall'altra; per ognuna la rassegna è spesso cronologica, dal problema più antico al più recente: il lettore ha così anche una chiave di lettura storica, che gli permette di seguire le evoluzioni dell'intera tipologia di enigmi.

Ne risulta un libro adatto a chi volesse avvicinarsi per la prima volta alla matematica ricreativa, perché mantiene anche la funzione di «antologia dei classici». Il lettore che è invece già familiare con l'argomento riconoscerà certo molti indovinelli proposti, ma altrettanto certamente non mancherà di apprezzare l'appendice finale in cui l'autore, oltre a elencare sinotticamente tutti gli enigmi proposti, riporta i risultati della sua accurata ricerca delle fonti dei problemi: un'operazione di correttezza del tutto ammirevole, e troppo spesso dimenticata.

Piero Fabbri

Enigmi
di Alex Bellos
Einaudi, Torino, 2019,
pp. 284 (euro 18,00)

Dalle piramidi ai grattacieli

La nascita di architetture spettacolari di ieri e di oggi

Come sarebbe la nostra esistenza senza l'ingegneria? Niente grattacieli, ascensori, case, monumenti, né automobili, telefoni, computer, Internet. Le nostre vite sarebbero sicuramente meno comode e più complicate. Se da un punto di vista filosofico è talvolta difficile inquadrare l'ingegneria tra le discipline scientifiche, un po' come avviene per la medicina, non si può negare l'accumulo di effetti che nel corso dei millenni ha avuto sullo sviluppo della civiltà umana. Tutto ciò, dalle piramidi egizie fino agli ultimi prodigi dell'edilizia, è il frutto di un'operazione di costruzione via via più complessa, che ha fatto ampiamente ricorso alle conoscenza scientifiche e ha dato un contributo decisivo anche alla possibilità di realizzare sogni estetici.

È una storia, quella del costruire, che Roma Agrawal, una giovane ingegnera strutturista di origine indiana, famosa per conferenze molto vivaci, intreccia alla propria esperienza professionale, svelando i segreti di alcuni degli edifici più iconici del mondo. Per esempio lo Shard di Londra progettato da Renzo Piano, e delle cui guglie e fondamenta è stata una delle responsabili. Oppure recuperando storie del passato, anche poco note, come quella di Emily Warren Roebling, che portò a termine uno dei ponti più famosi di sempre, quello di Brooklyn, quando il marito Washington Roebling si ammalò e non poté più seguire il lavori. Fu lei, una rarità in un mondo maschile, a tenere i rapporti con la committenza, con i fornitori e con gli operai, non esitando a visitare i cantieri sull'East River. Un esempio che ha sempre stimolato la stessa Roma, spesso l'unica donna nei gruppi in cui si trova a lavorare, e che lei stessa spera possa essere emulata sempre più da altre donne.

Costruire si legge a metà tra la storia dell'ingegneria civile, mostrando l'avanzamento della disciplina, e i suoi effetti sull'ambiente naturale e urbano. Ma è anche il percorso di formazione di una professionista che oggi lavora nei cantieri di mezzo mondo, dando dimostrazione concreta che un ingegnere si valuta dalle capacità e non dal fatto che indossi o meno una gonna.

Marco Boscolo

Costruire
di Roma Agrawal
Bollati Boringhieri, Torino, 2019,
pp. 264 (euro 24,00)

Verso l'ottavo continente

Le nostre conoscenze della Luna e come la colonizzeremo

La Luna è l'unico satellite naturale della Terra. Conosciuto, osservato e studiato sin dall'antichità, si potrebbe pensare che per gli astronomi non abbia più segreti. Ma, come sanno bene gli scienziati che nel corso dei secoli si sono dedicati allo studio delle sue caratteristiche fisiche e dinamiche, siamo ancora molto lontani dal conoscerla come vorremmo. E tutto questo nonostante la sua grandezza e vicinanza. Anzi, proprio a causa della sua grandezza e vicinanza. Già, perché queste due caratteristiche, considerate attributi capaci di rendere particolarmente favorevole l'esplorazione astronomica, sono state per gli studiosi della Luna fonte di ogni cruccio. Complice, naturalmente, la forza di gravità e la complessa interazione del sistema Sole-Terra-Luna, più che sufficiente a complicare lo studio del moto del nostro satellite anche senza considerare le perturbazioni prodotte dagli altri corpi del nostro sistema planetario.
A raccontarci l'avventura articolata e non ancora conclusa dello sforzo di comprensione del nostro satellite, del suo moto, della sua esplorazione, della sua possibile colonizzazione, arriva ora il libro di Ettore Perozzi, responsabile dell'ufficio per la sorveglianza spaziale dell'Agenzia spaziale italiana, capace di affrontare il tema da ogni punto di vista possibile, passando dall'aneddotica personale a pagine di meccanica celeste in cui si spiegano le eclissi e l'importanza nell'antichità di saperle prevedere con precisione, passando dalla letteratura, alla musica, alla cinematografia.
Ma il 2019 è anche l'anno in cui si celebra il cinquantesimo anniversario dello sbarco del primo essere umano sulla Luna. L'autore ripercorre così passato, presente e futuro dell'esplorazione della Luna, spiegando con competenza e ricchezza di dettagli i problemi che i futuri colonizzatori del nostro satellite potranno incontrare nel tentativo di costruire una base lunare in cui insediarsi stabilmente. Non a caso la Luna ormai da tempo è chiamata, forse con un eccesso di fiducia, l'«ottavo continente». L'unico, però, su cui non abbiamo ancora una base permanente. Ma è solo questione di tempo.

Emiliano Ricci

Luna nuova
di Ettore Perozzi
il Mulino, Bologna, 2019,
pp. 148 (euro 14,00)

Quello che non sappiamo

I pezzi che ancora mancano al grande puzzle della scienza

Lo scienziato è una persona così curiosa da aver fatto della curiosità la sua professione. Qualunque scoperta scientifica nasce come domanda nella mente del ricercatore, che poi cercherà di trovare una soluzione al suo interrogativo. È per questo che non bisogna sottovalutare il potere delle domande, anche se sono meno rassicuranti delle risposte. Partendo dalla constatazione che sono ancora tantissimi i pezzi che mancano al grande puzzle della scienza (il diagramma a torta nell'introduzione è, al riguardo, chiarissimo), il libro si propone di mostrare al lettore quanta strada la fisica debba ancora percorrere per sondare i grandi misteri dell'universo. Nel farlo, però, tira anche le somme delle tante importanti scoperte che sono già state fatte e riassume in forma vivace e accattivante le grandi conquiste della fisica contemporanea, grazie alle competenze complementari dei due autori, un ingegnere robotico (Jorge Cham) e un fisico delle particelle (Daniel Whiteson).
Le illustrazioni a fumetti che accompagnano l'esposizione hanno uno stile che a molti risulterà familiare: il primo autore è, infatti, famoso per essere l'ideatore di *PhD Comics*, un fortunatissima striscia che ironizza sulle difficoltà del giovane ricercatore nell'ambiente accademico. In questo libro i fumetti non sono un semplice contorno o un modo per sdrammatizzare: armonizzandosi perfettamente con il tono ironico dell'esposizione, sono anche un efficace strumento di divulgazione, tanto da riuscire, per esempio, a rendere comprensibili le complesse implicazioni della teoria della relatività.
Gli argomenti seguono il dipanarsi delle grandi domande della scienza, procedendo dalle soluzioni della fisica classica fino alle scoperte più recenti, di cui si tenta di chiarire l'importanza. Di che cosa è fatto l'universo? Che cosa sono l'energia e la materia oscura? Quante dimensioni esistono? Che cosa sono il tempo e lo spazio? Si arriverà a elaborare una teoria del tutto? La conclusione è che al momento «non ne abbiamo la più pallida idea», ma i rapidi progressi delle conoscenze sono il migliore incoraggiamento a continuare in questa esplorazione.

Anna Rita Longo

Non ne abbiamo la più pallida idea
di Jorge Cham e Daniel Whiteson
Longanesi, Milano, 2019,
pp. 416 (euro 22,00)

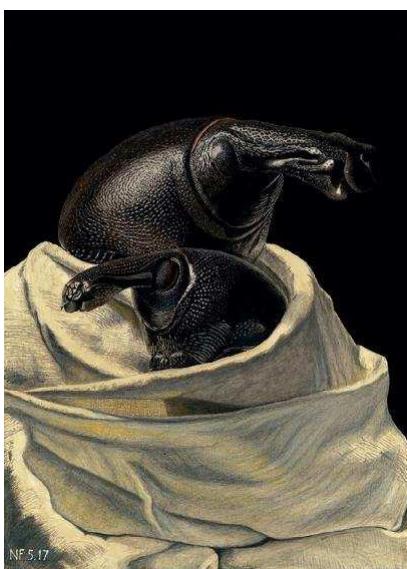
Dall'8 al 14 aprile
Auditorium Parco della Musica di Roma, e altre sedi nella città
https://www.auditorium.com.

Il senso dell'Eureka!

Il Festival delle scienze di Roma si interroga sulla natura delle invenzioni

Auditorium e non solo. Gli ambienti dell'Auditorium di Roma (*accanto e sotto*) e altre sedi della città ospitano il Festival delle scienze, ricco anche di spettacoli e mostre, come per esempio *La triste fine di un disegnatore di insetti*, del disegnatore Niccolò Falchi, che esporrà tavole (*in basso*) realizzate per musei di entomologia.

Un secolo e mezzo fa Dmitrij Ivanovic Mendeleev presentava la prima versione della tavola periodica degli elementi, un'invenzione intellettuale che ancora oggi rimane insuperata e continua a essere aggiornata. E se avete dubbi che si tratti di un'invenzione, e non di una scoperta, la XIV edizione del Festival delle scienze di Roma fa proprio per voi, perché centrata sul tema dell'invenzione. Alla domanda su che cosa sia esattamente un'invenzione provano a rispondere ospiti internazionali come Carolyn Porco, leader dell'Imaging Team per la missione Cassini-Huygens, e Gérard Mourou e Donna Strickland, che hanno ricevuto il Nobel per le loro «invenzioni rivoluzionarie nel campo della fisica dei laser».

Il tema centrale è declinato assieme al *parterre* di ospiti in relazione alla tecnologia (assieme Bill Buxton e Kirby Ferguson), all'etica (con Sheila Jasanoff) e all'intelligenza artificiale (con Tomaso Poggio, Laura Margheri e Giorgio Metta), senza tralasciare le riflessioni sui rapporti con il caso (con Federica Bertocchini, Eugenio Coccia e Silvia Marchesan). A volte, poi, le invenzioni sfociano in quel campo dell'immaginario che ha più a che fare

con la leggenda. È il caso di Frankenstein, di cui discuteranno lo scrittore e giornalista Mark O'Connell e la neuroscienziata Agnieszka Wykowska. Mentre il celebre Jared Diamond si concentrerà sul rapporto tra invenzione ed evoluzione.

Questi sono solo alcuni dei temi e degli ospiti dei 200 incontri previsti durante i sei giorni della manifestazione, che quest'anno oltre all'Auditorium Parco della Musica si allarga ancora, occupando temporaneamente 45 luoghi diversi, tra cui anche il MAXXI, il BioParco, le università cittadine, i musei e le biblioteche.

Oltre agli incontri, agli eventi didattici e a otto mostre, c'è anche un ricco cartellone di spettacoli, sempre a tema scientifico. A cominciare da *Shaping the invisible*, l'omaggio a Leonardo da Vinci (di cui ricorre il cinquecentesimo anniversario della scomparsa) dello storico dell'arte Martin Kemp assieme all'*ensemble* vocale I Fagiolini, per arrivare alla produzione che coinvolge quattro nomi importanti della musica italiana, Vittorio Cosma, Gianni Maroccolo, Max Casacci e Riccardo Sinigallia, che presentano *DNA* coinvolgendo anche Telmo Pievani. Ce n'è per tutti i gusti.

Marco Boscolo

Prossimo numero

a maggio

Un'origine complicata

di Francesco d'Errico, Lounès Chikhi e Anna Meldolesi

L'origine della nostra specie e della nostra cultura è più remota nel tempo e più dispersa dal punto di vista geografico rispetto a quanto ritenuto finora. Lo dimostrano alcune scoperte recenti che retrodatano di circa 100.000 anni la comparsa di *Homo sapiens* e la descrivono come «pan-africana».

L'Antartide sta collassando

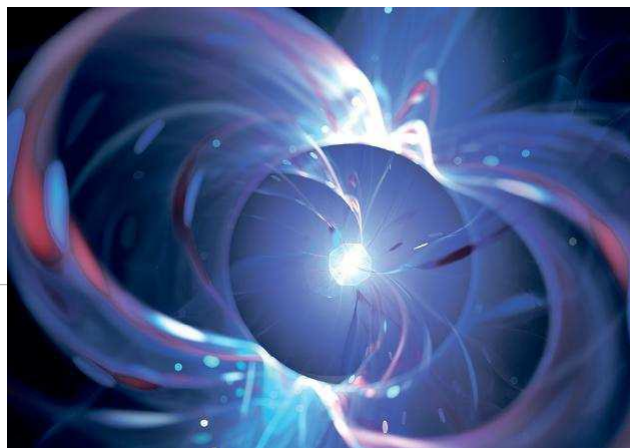
di Richard B. Alley

Il grande ghiacciaio Thwaites, nell'Antartide occidentale, ha cominciato a scorrere più rapidamente verso l'oceano. Se cominciasse a frantumarsi, potrebbe alzare il livello del mare addirittura di tre metri e mezzo in pochi decenni.

Vita interiore di una stella di neutroni

di Clara Moskowitz

Nuovi rivelatori in grado di misurare le onde gravitazionali prodotte dalle collisioni di stelle di neutroni promettono di fornire nuove informazioni sull'interno di questi oggetti enigmatici, che rappresentano la forma di materia più densa dell'universo.

SPL/AGF (*strumenti litici*); iStock (*stella di neutroni*)

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione:
Andrea Lignani Marchesani
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano,
telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati (D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - marzo 2019

ISSN 2499-0590

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief and Senior Vice President
Mariette DiChristina

President
Dean Sanderson

Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Francesca Bernardis: *La vita sociale dei babbuini di Amboseli;* Daniele Gewurz: *Azione inquietante, L'esopianeta della porta accanto*; Lorenzo Lilli: *L'ultima speranza;* Alfredo Tutino: *Fantasmi di fiori, Evoluti per essere attivi.*

ABBONAMENTI E ARRETRATI
GEDI Distribuzione S.p.A.

Per informazioni sulla sottoscrizione di abbonamenti e sulla richiesta di arretrati telefonare al numero 0864.256266 o scrivere a abbonamenti@gedidistribuzione.it o arretrati@gedidistribuzione.it
Fax 02.26681986.

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

FIEG — ads Accertamenti Diffusione Stampa

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8593 del 18/12/2018